DOI 10.15302/J-SSCAE-2025.12.036

中国电力装备制造业十年发展成效与展望

孙昌基[1]，吕俊复[2]，侯睿[3*]，简靖文[4]，果岩[5]，邓伟[6]，潘理达[4]

（1. 原机械工业部，北京 100031；2. 清华大学能源与动力工程系，北京 100084；3. 机械工业技术发展基金会，北京 100045；4. 中国电器工业协会，北京 100071；5. 机械工业北京电工技术经济研究所，北京 100070；6. 宁德时代新能源科技股份有限公司，北京 100176）

摘要：自2015年《中国制造2025》将电力装备列为十大重点发展领域以来，我国电力装备制造业实现了历史性跨越，已成为全球产业格局中的重要引领者。本文系统评估了2015—2025年我国电力装备制造业的发展成效，聚焦发电装备、输变电设备、节能与储能装备三大领域，从技术水平、产业规模、市场格局和全球影响力4个维度展开分析。研究表明，我国电力装备工业增加值年均增长9%以上，2024年规模以上企业超过3万家，全产业链国产化率达90%以上。通过构建“政策引导–创新驱动–市场拉动–生态协同”的分析框架，揭示了技术快速迭代、产业集群化发展和工程应用牵引是我国电力装备实现从“跟跑”到“领跑”的核心路径。面向2035年新型电力系统建设目标，未来需在高端材料、核心器件、数字化融合等方向持续突破，推动产业向价值链高端攀升。

关键词：电力装备；中国制造2025；自主创新；全球治理；新型电力系统

中图分类号：TM7　　**文献标识码：**A

Power Equipment Manufacturing Industry of China: Ten-Year Achievements and prospects

Sun Changji[1], Lyu Junfu[2], Hou Rui[3*], Jian Jingwen[4], Guo Yan[5], Deng Wei[6], Pan Lida[4]

(1. Former Ministry of Mechanical Industry, Beijing 100031, China; 2. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. China Machinery Technical Development Foundation, Beijing 100045, China; 4. China Electrical Equipment Industry Association, Beijing 100071, China; 5. Machinery Industry Beijng Electrotechnical Institute of Economic Research, Beijing 100070, China; 6. Contemporary Amperex Technology Co., Limited, Beijing 100176, China)

Abstract: Since *Made in China 2025* listed power equipment as one of the ten key development areas in 2015, the power equipment manufacturing industry of China has achieved a historic leap, becoming a significant leader in the global industrial landscape. This study evaluates the development achievements of China’s power equipment manufacturing industry from 2015 to 2025, focusing on three major fields: power generation equipment, power transmission and transformation equipment, and energy saving and storage equipment. The analysis is conducted from four dimensions: technological level, industrial scale, market structure, and global influence. The study reveals that the added value of China’s power equipment industry has grown at an average annual rate of over 9%, with over 30 000 large-scale enterprises by 2024, and a localization rate of over 90% across the entire industrial chain. By constructing an analytical framework of “policy guidance – innovation-driven development – market driving – ecological synergy,” this

收稿日期：2025-12-30；**修回日期：**2026-02-03

通讯作者：*侯睿，机械工业技术发展基金会教授级高级工程师，研究方向为科技政策研究和行业管理；E-mail: horui2000@163.com

资助项目：中国工程院咨询项目“制造强国建设第二步走（2025—2035）战略研究”(2025-PP-01)，“我国制造业重点领域技术路线图研究”(2025-HZ-10)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

study identifies rapid technological iteration, cluster-based industrial development, and major engineering demonstration as the core pathways for China's power equipment to transition from following to leading. Looking toward the 2035 goal of building a new power system, future efforts must focus on continuous breakthroughs in high-end materials, core components, and digital integration to propel the industry toward the higher end of the value chain.

Keywords: power equipment; Made in China 2025; independent innovation; global governance; new power system

一、前言

电力装备作为制造强国战略的十大重点领域之一[1]，是保障国家能源安全、推动绿色转型的核心战略性、基础性产业。近十年来，全球能源格局经历了深刻调整，气候变化与能源安全的双重挑战促使各国加快能源转型步伐，电力装备成为国际竞争的战略关键节点。现阶段我国在“能源与发电”领域已实现全球领先的论断[2]，引发了国际社会的广泛关注。在此背景下，科学评估2015—2025年我国电力装备制造业的发展成效，解析全球领先地位的形成路径，展望未来发展方向，具有重要的意义。

尽管现有研究已关注到我国在特定电力装备领域的突破，但是缺乏对2015—2025年这一完整战略周期内全产业链系统性跨越的综合性评估。对于产业成功背后的“政策–创新–市场–生态”多维度联动机制，以及在全球标准制定与价值链地位攀升方面的深度解析仍显不足。此外，面向2035年构建新型电力系统的宏伟目标，亟需立足历史成就、兼具全局视野与前沿洞察的战略展望。

本文系统评估了2015—2025年我国电力装备制造业的整体发展成效，研究覆盖发电装备（清洁高效煤电、大型水电、核电、风电、光伏等）、输变电设备（特高压、柔性直流、智能电网等）及节能与储能装备三大核心领域。通过构建“政策引导–创新驱动–市场拉动–生态协同”的系统性分析框架，本文从技术水平、产业规模、市场格局和全球影响力几个方面展开量化评估，揭示技术快速迭代、产业集群化发展、重大工程应用牵引的核心路径。研究整合呈现了“四个百万”（百万千瓦火电、水电、核电及百万伏特高压）等标志性成就，量化分析产业链国产化率超90%，工业增加值年均增长9%以上等关键指标。面对2035年新型电力系统的建设目标，前瞻性地提出了在高端材料、核心器件、数字化融合等方向上的突破路径，为产业持续向全球价值链高端攀升提供了决策参考。

二、近十年我国电力装备制造业发展成效

（一）国家战略需求支撑成效显著

电力装备制造业全面贯彻能源安全新战略，以系统性突破支撑新型能源体系构建、服务“双碳”目标、驱动新型工业化、拓展全球合作，实现从“技术跟随”到“战略引领”的跨越。

1. 发电设备向清洁高效转型

煤电装备实现系统性升级。我国50%以上煤电机组具备深度调峰能力[3]；百万千瓦级超超临界机组投运超200台，供电煤耗降至平山电厂二期工程的251 g/(kW·h)以下，较2015年下降31 g/(kW·h)；建成全球规模最大的高效煤电体系。660 MW循环流化床项目入选国际能源署全球案例，以其全负荷稳定运行605 ℃/623 ℃超超临界参数、20%深度调峰能力、精准温控体系，为全球能源转型提供中国方案。

大型水电装备登顶世界巅峰。单机容量从“十三五”初期的7.7×10^5~8×10^5 kW提升至“十四五”末期的1×10^6 kW，白鹤滩水电站16台百万千瓦机组全部投产，成为全球首个百万千瓦级水电项目。抽水蓄能机组水头参数突破724 m，单机容量达425 MW，变速抽水抽蓄技术已实现自主化。

核电装备实现三代技术自主化。“华龙一号”“国和一号”机组批量应用，实现了核电关键主设备100%国产化以及关键零部件技术的自主可控[4]，压力容器、主泵、蒸汽发生器等关键部件100%自主制造。钍基熔盐堆关键设备国产化率达100%。

燃气轮机装备取得重大突破。自主研制的G50（50 MW）燃机于2023年商业运行，“太行R110”（110 MW）燃机迈入商业化应用新阶段[5]，300兆瓦级F级燃机完成样机1000 h试运行，50 MW掺氢燃机实现满负荷运行（氢掺混比例达30%）。

风电装备大型化进程加速。10兆瓦级“沙戈荒”风电机组实现批量下线；海上16 MW机组实现批量化应用；20兆瓦级深远海漂浮式风电机组完成涉网测试；全球最大的26兆瓦级海上风电机组在

山东并网发电，实现了从设计到制造的全国产化；25 MW 构网型海上风电机组在山东成功下线；16 MW 国产化海上低频风机研制成功。风电整机制造商全球市场份额从2015年的25%提升至2025年的60%，叶片、齿轮箱、发电机产能分别占全球的64%、80%、73%[6]。

光伏装备技术持续迭代升级。基于TOPCon技术平台的大面积单结晶硅太阳能电池最高光电转换效率突破27.79%，基于N型TOPCon的钙钛矿叠层电池转化效率突破34.76%；n型异质结（HJT）电池转化效率达26.61%，量产平均功率突破740 Wp。国际能源署发布的报告中指出，在太阳能光伏领域，我国在供应链的每个环节都占据全球80%以上的产能[7]。

2. 输变电设备实现全球引领

特高压技术形成完整体系。建成交流特高压工程22项，变电站40座，线路长度为2×10^4 km，气体绝缘全封闭组合电器（GIS）电压等级提升至1100 kV，短路开断能力达63 kA；建成投运直流特高压工程20项，总容量为1.6×10^8 kW，线路长度为3.5×10^4 km，较2015年分别增长400%、433%、250%。±1100 kV特高压直流输电技术实现全产业链自主化，换流变压器单台容量达607.5 MVA。

柔性直流输电技术取得突破。我国柔性直流输变电设备已在张北、乌东德、昆柳龙等重大示范工程中展现出卓越性能，有效提升了电网稳定性并促进了可再生能源的大规模应用。完成了±800 kV/5 kA柔性直流换流阀的研发及产业化，5 kA绝缘栅双极晶体管（IGBT）器件实现工程应用，攻克了多端柔性直流系统协调控制难题。其中，张北柔性直流工程建成全球首个四端环网，新能源消纳能力提升25%。±525 kV交联聚乙烯绝缘柔性直流电缆研制成功，标志着我国深远海大容量柔性直流输电迈出关键一步。

智能电网技术规模化应用。基于自主可控芯片的直流控保系统在陇东—山东工程中应用，国产直流干式电容器在张北柔性直流工程中投运。数字孪生电网、柔性低频输电等技术在藏东南—粤港澳大湾区示范工程中开展验证。中国南方电网有限责任公司已实现超1×10^6 km输电线路具备“机巡为主、人巡为辅”，500 kV及以上线路灾害风险智能感知全覆盖，35 kV及以上架空线路无人机自主巡检无死角，99.5%的变电站实现无人值守；配电自动化有效覆盖率提升至99.72%，配网自愈覆盖率达97.71%。

关键部件自主化水平显著提升。4.5 kV/2000~6250 A、6.5 kV/1000~5000 A等级IGBT器件实现批量应用；±800 kV及以上特高压直流工程用大功率晶闸管国产化率已超过90%；±1100 kV直流套管技术填补国际空白；特高压变压器分接开关、地理信息系统（GIS）绝缘拉杆均已实现国产化；无SF_6环保气体绝缘设备在110~550 kV等级实现工程应用；超高压交联聚乙烯（XLPE）国产绝缘料在220 kV交流电缆中已实现工业化应用；碳足迹核算体系初步建立。

高温超导实现从“跟跑”到“并跑”再到“领跑”的跨越式发展。第二代高温超导带材核心材料（C-276合金基带）研发成功，建成全球领先的千米级第二代高温超导带材（YBCO）连续生产线；同时，超导限流器、储能系统等关键装备完成挂网验证，初步构建起涵盖材料制备、核心部件、系统集成和工程应用的完整产业链。

3. 节能与储能装备快速扩容

节能装备市场规模达1.66万亿元，较2015年增长380%。IE4高效电机产量占比从不足5%跃升至30%，非晶合金变压器损耗降低30%以上，配电变压器新产品75%达到二级（一级）能效标准。其中，500 kVA以上二级油浸式配电变压器效率优于美国[8]。

储能装备技术多元化发展。锂离子电池储能系统能量转换效率达92%，成本较2015年下降68%。钒液流电池、压缩空气储能、飞轮储能实现工程化应用。2024年，宁德时代新能源科技股份有限公司储能系统海外出货量超15 GW·h，占欧洲市场份额的30%以上。氢能装备全产业链自主可控，膜电极、双极板、电堆等核心部件国产化率超90%，燃料电池系统成本降至500元/kW，全球市场份额达45%。

（二）自主创新能力跨越式发展

1. 研发投入与专利产出均获增长

2024年，我国电力行业投资规模约为5340亿美元，同比增速9%。其中发电领域投资规模约为4290亿美元，同比增速6.8%；可再生能源发电投资规模占发电总投资比重超80%，较2016年提升13%[9]。彭博新能源财经研究报告显示，2024年，

中国能源转型投资额远超美国、欧盟和英国；其中清洁能源供应链投资占全球投资总额的81%，且未来数年仍将占据主要投资份额[10]。追踪部分电力装备上市企业数据显示，2015—2024年，企业研发投入年均复合增长率达18.21%，明显高于制造业平均水平。

专利数量、质量双提升。国家知识产权局统计数据库数据显示，2015—2024年专利数量年均增速超11%，其中发明授权占比13.5%。《专利合作条约》（PCT）专利申请量超1600件，是10年前的2.5倍。输变电领域核心专利覆盖换流阀、直流套管、控制保护等关键技术，专利同族数量位居全球前列。氢能领域的专利申请量年均增长23%，覆盖电解水制氢、氢储运及燃料电池应用全链条。截至2024年年底，新型储能领域PCT专利数量超1600件，是10年前的2.5倍。

2. 创新平台建设取得突破

企业创新主体地位强化。2015—2024年，我国电力装备行业在国家级科技创新平台建设方面取得了系统性突破。据统计，新增和重组全国重点实验室共计13个，中国电气装备集团有限公司、西安交通大学、湘电集团有限公司等组建了输变电装备技术全国重点实验室；新增国家研发创新平台超过25个，包括国家能源局认定的国家能源研发创新平台，工业和信息化部认定的国家制造业创新中心、产业技术基础公共服务平台，国家发展和改革委员会／科学技术部支持的重大科技基础设施、中试平台等；新增电力装备类国家企业技术中心约30家（含部分续评升级）；优化整合国家工程研究中心8个 。哈尔滨电气集团有限公司、中国东方电气集团有限公司等骨干企业依托全国重点实验室布局全球化研发网络，突破超高水头水电机组、核主泵、特高压换流阀等核心技术。

“产学研用”协同深化。金风科技股份有限公司联合清华大学、西安交通大学攻克16 MW海上风机叶片气动弹性稳定性关键技术；国内企业和机构签署德国BorWin6海上风电柔性直流输电工程换流站合同，标志着我国柔性直流输电技术具备了国际领先的核心竞争力。通过“基础研究–技术开发–工程验证”闭环，白鹤滩工程推动百万千瓦水电机组自主化，张北柔性直流工程验证了柔性直流技术的成熟度。

3. 智能制造与绿色工厂显现成效

截至2025年年底，我国已建成28个国家级智能制造示范工厂，覆盖核电、风电、特高压等领域，生产效率平均提升35%，产品不良率下降40%。中国东方电气集团有限公司德阳基地打造大型水轮机组“黑灯工厂”，通过“第五代移动通信（5G）+工业互联网”实现全流程自动化，转轮加工精度达0.02 mm。

绿色制造体系全面推广。光伏组件回收技术取得突破，建成万吨级退役组件资源化利用示范线，全国首条30 MW组件回收中试线，采用“物理+热解+化学提纯”的综合回收工艺，完整组件回收率达94%以上，完整及破碎组件综合回收率可达92.23%。

4. 产业链完整性全球领先

关键零部件国产化率超90%。输变电领域特高压换流阀、继电保护设备的国内市场占有率分别达85%、80%以上[11]。新能源领域风电机组主控制系统实现100%国产化。功率半导体器件国产化率提升至62%，4.5 kV/6.5 kV IGBT实现工程应用，但高端芯片仍依赖进口。超高压电缆（220 kV）XLPE绝缘料和220 kV超光滑屏蔽料研发取得新进展，但市场上220 kV及以上高压电缆绝缘料仍然高度依赖进口。

我国电力装备制造业形成多个电气设备制造集团与基地。中国东方电气集团有限公司、哈尔滨电气集团有限公司、上海电气集团股份有限公司在大型发电装备领域主导市场；中国电气装备集团有限公司通过整合核心装备制造企业，成为我国输配电领域资源最集中、产业链最完整的中央企业。德阳–成都产业基地研发制造了全国70%的气电机组、60%的核电机组、50%的大型电站铸锻件、40%的水电机组、30%的清洁高效煤电机组，一批“国之重器”技术装备相继在德阳诞生[12]。通过核心技术自主化、产业链现代化和绿色智能制造，我国电力装备制造业集群实现了由“跟跑”到“领跑”的跨越，为全球能源转型提供了中国方案。

5. 电力装备技术水平全球一流

在我国迈向制造强国的征程中，电力装备制造业铸就的“四个百万”里程碑，百万千瓦火电机组、百万千瓦水电机组、百万千瓦核电机组以及百万伏特高压输电线路共同构成了一个环环相扣、自

主可控的“大国重器”谱系（见表1、表2）。

（三）产业链供应链韧性与现代化

1. 企业梯队结构不断优化

金字塔形企业生态体系成熟。大型中央企业和地方国有企业凭借资源禀赋、政策支持和重大项目承接能力，在特高压输电、核电、大型水电、火电、气电等国家战略性领域占据主导地位；在各个细分领域由多元化龙头企业支撑，其中既有实力雄厚的地方国有企业，也有充满活力的民营企业。截至2024年年底，电力装备领域拥有国家级专精特新“小巨人”企业236家，较2015年增加198家。

国际化经营能力增强。金风科技股份有限公司在丹麦、德国设立研发中心，明阳智慧能源集团股份公司在东南亚、南美建立生产基地，本地化制造能力显著提升。

2. 供应链安全保障韧性增强

建成“国家级–省级–企业级”三级检测网络，覆盖全产业链关键产品。针对功率半导体、高端绝缘材料等短板，实施产业基础再造工程，超长期特别国债单项目支持比例最高达30%。建立关键材料战略储备机制，锂、钴、稀土等储能材料储备量满足6个月生产需求。

表 1　电力成套装备技术水平

装备名称	发展水平	判断依据
清洁高效煤电成套装备	世界领先	高效发电超超临界机组数量、总装机容量全球第一，630 ℃和650 ℃机组开展示范
燃气轮机发电装备	有一定差距	自主研制50 MW、300 MW燃机取得突破，G/H级燃机研发中，掺氢 / 氨燃烧技术初始阶段
核电成套装备	世界领先	设备国产化率超90%，四代堆型实现示范，聚变装置关键部件研发中
水电成套装备	世界领先	单机容量、水头参数全球领先，抽水蓄能装机全球第一
风电装备	世界先进	16 MW海上风机批量化，26 MW投运发电，18 MW以上国产轴承突破，漂浮式风电研发示范阶段
氢能发电装备	有一定差距	质子交换膜（PEMFC）、单体固体氧化物燃料电池（SOFC）等技术在交通领域领先，发电系统尚在示范阶段
特高压交流输变电成套装备	世界领先	±1100 kV直流、1000 kV交流设备全部国产化，柔性直流技术全球领先
特高压直流输电成套装备	世界领先[15]	4.5 kV/6.5 kV IGBT国产化；特高压套管、分接开关实现突破
柔性直流输变电设备	世界领先	
低频输电系统用核心设备	世界领先	
智能输变电成套设备	世界领先	继电保护、智能组件、数字孪生系统实现自主可控
智能配电网成套装置	世界先进	
绿色环保型输变电设备	世界先进	SF_6替代技术成熟，碳足迹核算体系建立

表 2　部分重大技术突破情况

重大突破与标志性装备 / 技术	主要意义
1000 MW水电机组转轮最优效率高达96.7%	引领世界水电进入“百万单机时代”
26 MW全球最大海上风电机组成功投运发电	超大功率风机整机设计、系统集成和可靠性验证全面领先
2 MW热液态燃料钍基熔盐实验堆钍铀转换效率达60%	保障国家能源可持续发展与节能减排重大战略需求
完全自主设计的750 MVA柔性直流变压器研制成功	掌握定义未来电网形态的核心技术能力
252/550 kV高速开断技术突破毫秒级（<25 ms）响应瓶颈	提升电网暂态稳定性，引领全球技术标准
具有完全自主知识产权的±800 kV及±1100 kV直流特高压套管研制成功	解决了制约我国特高压工程核心装备“最后一千米”瓶颈问题
第二代高温超导带材金属基带（C-276合金基带）实现完全自主可控	摆脱对国外供应商的依赖

（四）市场格局与国际化成果

1. 国内外市场规模持续扩大

在国内市场方面，电力装备制造业作为“政策敏感型”[13]行业，其发展始终与国家能源战略高度绑定，同时受技术变革和市场需求的双重影响，十年来，电力装备制造业经历了“政策调整→需求爆发→结构优化”的完整周期，产业规模也随着产业政策呈现阶段性波动。2015—2018 年，电力装备制造业由“铺摊子”向“补短板”转型；2018 年受宏观经济去杠杆叠加新能源政策（如光伏“531”新政，补贴大幅退坡）调整影响，市场需求骤减；2019—2020 年，在“新基建”政策托底下，行业市场需求回暖；电力装备规模进入恢复期；2021 年，在“双碳”目标下，我国发电设备产量创近 10 年新高，新能源和可再生能源设备成为重要支撑[14]，行业迎来质量与价值双升的黄金发展期；2022—2025 年，在《电力装备行业稳增长工作方案（2023—2024 年）》的引领下，行业为迎合新型电力系统建设需求，开始向高端化、智能化、绿色化转型升级，产业结构进入优化期，市场规模增速略有回落。

我国全社会用电量从 2015 年的 5.6×10^{12} kW·h 增至 2025 年的 1.04×10^{13} kW·h，用电量约翻了一番，带动了电力装备需求刚性增长。电网投资保持稳定，2015—2025 年 11 月累计投资超 6 万亿元。

截至 2025 年 11 月，电力装备行业营业收入突破 10 万亿元，约是 2015 年的 3 倍多；规模以上企业超 3 万家，较 2015 年增长超 60%。发电装备产量爆发式增长，截至 2025 年年底，我国发电机组（发电设备）产量为 $3.708\ 7\times10^{8}$ kW，约是 2015 年的 3 倍；太阳能电池（光伏电池）产量为 $8.327\ 4\times10^{8}$ kW，是 2018 年的 14 倍。

2. 国际市场份额稳步提升

国家海关总署发布的相关数据显示，2025 年电力装备重点产品出口额超 1.6 万亿元。2025 年变压器出口金额为 646 亿元，2025 年前三季度变压器出口达 464.8 亿元，9 月单月出口达 66.3 亿元，创历史新高。欧洲市场同比增长 138%，亚洲市场同比增长 65%。在过去的 10 年里，我国助力全球风电、光伏发电的成本分别下降超过 60%、80%[16]。

海外重大项目带动全链条输出。巴基斯坦卡拉奇 K2/K3 核电项目、沙特阿拉伯红海新城 1.5 GW 光伏项目、希腊克里特岛海上风电项目累计合同额超 200 亿美元。国家电网有限公司中标沙特阿拉伯 ±500 kV 柔性直流项目、巴西±800kV 特高压项目，实现技术标准与装备一体化输出。

（五）全球地位与标准话语权

1. 国际标准制定主导力增强

“十四五”期间，电力装备行业承担国际电工委员会（IEC）、95 个技术委员会（TC）、80 个分技术委员会（SC）秘书处 3 个、主席 4 人、工作组召集人 89 人次，占中国在 IEC 召集人总数的 29%。牵头申报 IEC 国际标准，提交了 63 项标准提案，54 项成功立项，立项成功率为 86%，已发布 45 项，电力装备行业提出所属领域 IEC 国际标准提案的占比在逐年稳步提高。

依托我国电力领域重大工程和重要技术的示范和应用成果，电力装备行业牵头多项重要国际标准研制。如在发电领域，先后牵头研制了《热电联产发展报告》（IEC TR 63388: 2021）、《智能水电厂技术导则》（IEC/IEEE 63198—2775: 2023）；在输变电领域，先后牵头研制了《高压直流断路器》（IEC TS 62271-313）、《高压直流转换开关》（IEC TS 62271-315）、《高压复合绝缘子试验和验收》（IEC 62217）等重要国际标准；在配电领域，先后牵头研制了《智能型成套设备附加要求》（IEC TS 63290: 2024）、《适于宽频带应用的互感器的选型与接口》(IEC TR 61869-106)等重要国际标准；在用电领域，先后牵头研制了《电气运输设备 第 2-1 部分》（IEC 63281-2-1: 2024）、《退役电池回收放电通用指南》（IEC 63648）等重要国际标准；在基础共性领域，先后牵头研制了《在环境意识设计中考虑材料循环的导则》（IEC TS 63428: 2024）、《用于电子电气产品与系统生命周期评价的产品种类规则》（IEC 63366）等重要国际标准，将中国工程实践转化为国际规范。

2. 价值链地位持续攀升

从设备供应商转型为系统解决方案提供商。2024 年，新签境外电力项目 759 个，合同额达 672.8 亿美元，同比增长 31%，涉及装机容量 80.5 GW。沙特阿拉伯红海综合能源项目采用中国特高压柔性直流技术，带动国产换流阀、直流套管等高端装备出口，单项目带动产业链出口超 50 亿美元。

3. 国际竞争优势凸显

与传统装备强国相比，中国电力装备呈现五大优势：① 全产业链完整性，从材料、部件到成套装备自主可控；② 成本优势显著，风电设备成本较欧美低40%，交付周期缩短30%；③ 技术迭代迅速，从引进到“领跑”平均周期5~8年，在特高压、光伏、储能等领域实现反向输出；④ 工程经验丰富，建成全球80%的特高压工程，大型工程验证能力无与伦比；⑤ 市场规模巨大，国内市场[17]支撑技术快速成熟后向海外溢出（见表3）。

三、电力装备制造业发展经验解析

（一）国家战略体系化引导

1. 顶层规划明确方向

《中国制造2025》确立了电力装备核心零部件国产化率为70%、关键设备国产化率为80%的量化目标[1]；“十三五”“十四五”时期明确能源规划清洁化、智能化转型路径；“可再生能源技术”“智能电网技术与装备”等重点研发计划，集中突破高效光伏电池、大功率海上风电、柔性直流输电等关键核心技术瓶颈；地方政府同步制定配套落实方案，形成中央与地方政策协同推进的合力；《电力装备行业稳增长工作方案》配套滚动推进的机制。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》将新型电力系统建设上升为国家战略，为产业发展提供根本遵循。

2. 精准扶持关键环节

设立超长期特别国债、制造业转型升级基金等专项支持，高端绝缘材料、大功率IGBT、智能传感器等“卡脖子”环节单项目支持比例最高为30%。实施首台（套）重大技术装备保险补偿机制[18]，推动百万千瓦水电机组、三代核电设备、特高压输变电设备等实现产业化。在“揭榜挂帅”等新型科技项目组织机制推动下，“产学研”协同创新不断深化，近年来我国在16~26 MW海上风电机组、特高压换流阀等重大技术装备领域取得重要突破。

3. 技术规范与市场协同发力

构建“技术规范–工程验证–市场应用”闭环机制，2015—2024年在特高压、储能等领域形成200余项核心技术规范，明确设备性能、接口、安全等关键指标。通过对“华龙一号”“国和一号”、张北柔性直流等重大工程验证技术规范可行性，陇东—山东、宁夏—湖南等特高压工程率先应用自主规范，设备国产化率达100%，带动产业链整体升级。市场应用反馈推动规范迭代，形成良性循环。

（二）坚韧拼搏自主创新

1. 企业创新主体强化

企业研发投入强度持续提升，2024年龙头企业平均研发强度超过8%，建立“研发补助–保险补偿–应用奖励”全链条支持。中国电气装备科学技术研究院等单位依托国家级输变电技术研究中

表 3　电力装备优势

技术领域	中国优势 / 进展	传统强国 / 地区优势	关键技术差异
燃气轮机	50~110兆瓦级自主燃机商业运行，G/H级在研	美国、德国、日本垄断H级（400 MW+，效率64%）市场	功率与效率：单机最大功率与顶尖效率尚有差距；高温合金叶片材料寿命与成本控制待提升
特高压输变电	±110 kV直流/1000 kV交流全产业链，批量出口	高压 / 超高压技术成熟，特高压工程经验少	从标准、设计到工程具备完整体系
清洁能源装备	光伏、风电产能全球领先；绿氢产能占全球50%；具备完全自主知识产权的水电机组，单机容量不断刷新世界纪录	欧洲、日本部分高端部件（PEMFC电解槽）领先；水电技术在转轮精细化设计、高端材料和系统集成领域保持领先	全产业链成本优势显著，前沿技术加速追赶
电力电子技术	4.5 kV、6.5 kV IGBT工程应用，国产化率为62%	美国、日本垄断高端IGBT芯片，德国优势在高端设备	高端芯片为短板，但应用场景驱动追赶迅速
智能电网	智能配电、数字化电网应用规模全球第一	技术在部分领域领先，但应用规模小	工程应用广度与深度领先

心，聚焦柔性直流、特高压等关键领域，突破多项核心技术，多端柔性直流输电系统协同控制技术达到国际领先水平。

2. “产学研用”协同攻关

形成“基础研究–技术开发–工程验证–产业化”闭环。高校聚焦基础理论，如清华大学电力电子器件、浙江大学流体机械、西安交通大学绝缘材料等；科研院所主攻应用开发，中国电力科学研究院有限公司、西安高压电器研究院股份有限公司等突破特高压绝缘、柔性直流控制等关键技术；制造企业负责工程化，用户提供验证场景。创新联合体承担国家重大科技项目50余项，其中国家级特等奖3项、一等奖8项。

3. 重大工程牵引迭代

“十二五”以来，依托“西电东送”、白鹤滩水电站、“华龙一号”“国和一号”、张北柔性直流电网等重大工程，完成50余项重大技术装备验证。先后推动1×10^6 kW水电机组、柔性直流技术、三代核电技术等一系列重大突破，助力技术产业化。实现工程反哺技术迭代，形成“需求拉动创新、创新支撑工程”的良性循环。

（三）产业生态协同演进

1. 全链条价值网络构建

电力装备产业从“单点设备制造”向“全链条生态运营”转型，创新联合体建设步伐加快。上下游企业通过技术协同等方式形成一体化生态体系。如金风科技股份有限公司联合多家公司解决海上风电难题，2024年该联盟企业的海上风电装备国产化率提升至98%，整机成本较2020年下降30%，光伏产业实现“多晶硅–硅片–电池–组件–逆变器”全链条自主，龙头企业垂直一体化率超80%，成本控制[19]能力实现全球领先。

2. 跨领域创新要素融合

金融资本深度嵌入创新链。产业生态打破“技术–产业”二元分割，推动“企业–高校–科研院所–金融–政府”多元主体融合，形成“创新链–产业链–资金链–政策链”深度联动。国家制造业转型升级基金将电力装备列为重点支持方向之一，通过资本引导、投后赋能、产业链协同等方式，系统性破解行业融资难、创新慢、“卡脖子”等瓶颈。依托北京未来科学城“能源谷”及中关村示范区创新资源汇聚了多家能源领域龙头企业和科研机构，并深度联动多家等顶尖高校，构建“产学研用”融合的创新生态。

3. 全球生态网络重构

“走出去”与“引进来”双向联动。通过海外并购和研发中心布局整合资源。特变电工股份有限公司收购德国公司，金风科技股份有限公司在澳大利亚建立产业园，西门子歌美飒可再生能源公司在中国建立全球最大的风电装备基地。此外，“一带一路”沿线建立泰国罗勇、越南海防等产业园，形成“中国技术+当地制造+全球市场”模式，2024年园区企业出口额达40亿美元。

（四）标准与质量体系完善

1. 多层级标准体系

国家标准突出安全底线，行业标准聚焦技术性能，团体标准响应市场需求。推动标准与技术研发、产业应用同步发展，在特高压、储能等领域实现标准先行。2015—2024年，在特高压、储能、氢能等新兴领域发布团体标准800余项，平均制定周期12个月，远快于国际标准的24个月。

2. 全链条检测网络

建成国家级质检中心15个、省级中心45个，覆盖从材料到系统的全检测需求。针对16 MW风机、±1100 kV换流阀等超大装备，建设盐城、西安等极端环境模拟测试基地，可模拟台风、极寒、高海拔等工况，测试能力全球唯一。新能源装备检测精度达0.5%，获国际实验室认可合作组织（ILAC）国际互认，支撑出口认证。

3. “一带一路”标准联通

积极推动“华龙一号”核电技术、特高压输电等重大装备技术标准“走出去”，已在巴基斯坦、阿根廷[20]、巴西、沙特阿拉伯、埃及、越南等20余个国家的能源合作项目中实现中国技术标准的本地化应用。通过工程总承包、技术许可、标准外文版发布及双边技术交流等方式，有效提升中国标准的国际接受度。

截至2025年，中国企业与科研机构已牵头和参与编制国际大电网会议（CIGRE）技术导则和工作组报告，内容涵盖柔性直流输电、特高压设备运维、新能源并网等前沿领域，显著提升了我国在国际电力标准体系中的话语权。同时，依托行业龙头

企业和国家级标准化组织，在沙特阿拉伯、巴西、印度尼西亚等国家设立电力技术标准海外服务中心或本地化支持平台，提供技术咨询、标准比对与人员培训等一体化服务，有效助力东道国提升电力系统技术水平，并显著降低中国电力装备与工程服务进入国际市场的准入壁垒。

（五）典型案例

1. 输变电设备：产业链协同驱动技术群体性突破

2015—2025年是中国输变电装备从“跟跑”到“领跑”的10年。2015年前，特高压换流阀、直流套管等核心设备国产化率不足30%，高端市场被ABB集团、西门子股份公司垄断。通过构建“政府引导–企业主体–工程牵引–标准同步”的协同创新体系，实现国产化率跃升至95%以上，形成覆盖特高压、柔性直流、智能装备的完整技术矩阵。

（1）创新生态重构：打破“单点突破”惯性

以“产业链为纽带”整合创新主体：国家电网有限公司等用户单位提出工程需求，中国西电集团有限公司、保定天威保变电气股份有限公司等制造企业主导研发，清华大学、西安交通大学等高校突破基础理论，200余家单位组建创新联盟，形成“需求牵引–联合攻关–应用验证–反哺迭代”闭环。关键机制在于目标协同，以“双碳”和特高压规划为导向，同步设定技术、成本、安全三维目标；链条协同，贯通“材料改性–器件研制–装备制造–工程应用–标准制定”全链条，实现换流阀用6 in晶闸管、直流套管用高性能绝缘纸等上游材料与下游装备的同步开发，产品研制周期缩短40%。

（2）技术群体性跃升：从单体突破到系统领先

特高压装备技术群：攻克±1100 kV换流阀、直流套管、现场组装式变压器三大核心。6 in电控晶闸管（6300 A）打破国外垄断，换流阀国产化率从30%提高至100%；±1100 kV胶浸纸电容式套管填补国际空白，解决了高海拔外绝缘“最后一千米”难题；1000 kV现场组装式变压器支撑“三交九直”工程，输电能力提升40%，设备成本降低35%。

柔性直流技术群：张北四端柔性直流电网工程驱动、集成门极换流晶闸管（IGCT）等核心器件自主化，6.5 kV/3 kA IGBT换流阀与6.5 kV/4 kA IGCT换流阀实现工程应用，新能源消纳能力提升25%，为全球新能源并网提供关键路径。

智能装备技术群：开发特高压设备状态监测系统与数字孪生变压器，状态监测覆盖率为90%，故障预警准确率为85%，运维效率提高40%，推动电网运维从“定期检修”转向“状态检修”。

2. 新能源装备：生态融合推动价值链攀升

“十三五”初期，我国新能源装备“大而不强”：风电以1.5 MW机型为主，主轴承、变流器依赖进口；光伏“三头在外”（原料、设备、市场），技术路线受制于人。通过“技术–制造–应用–外送”全链条生态重构，2024年风电整机、光伏组件产能分别占全球的60%、85%，实现从价值链中低端向高端跃进。

（1）技术路径自主化：从“跟随”到“引领”

风电装备：金风科技股份有限公司牵头联合南京高速齿轮制造有限公司（齿轮箱）、中材科技股份有限公司（叶片）等组建创新联盟，攻克16 MW海上风机超长叶片气动弹性稳定性、高扭矩传动系统可靠性等技术，2024年海上风机国产化率达98%，整机成本较2020年下降30%。如东海上风电集群配套±400 kV柔性直流工程，突破远海送出瓶颈，实现深远海风电规模化开发。

光伏装备：隆基绿能科技股份有限公司推动单晶钝化发射极和背面接触（PERC）技术路线成为主流，N型TOPCon电池量产效率达25.5%，制造成本较2015年下降75%。通威股份有限公司、新疆大全新能源股份有限公司实现高纯多晶硅自主化，产能占全球的95%，彻底扭转“原料在外”局面。2024年N型电池市场占比为71.1%，带动全产业链技术标准重构。

储能装备：宁德时代新能源科技股份有限公司、比亚迪股份有限公司等构建“电池–管理系统–集成应用”生态，磷酸铁锂电池循环寿命超8000次，成本降至0.5元/（W·h），2024年新型储能装机超30 GW。光储一体化模式在青海塔拉滩15 GW光伏基地应用，配置1.2 GW·h储能，弃光率降至3%以下。

（2）产业生态全球化：从出口产品到输出体系

企业从“卖产品”转向“建生态”。在海外布局方面，隆基绿能科技股份有限公司在马来西亚、越南建硅片–组件一体化基地，规避贸易壁垒，

2024年海外组件出货量占比45%；金风科技股份有限公司在阿根廷、澳大利亚建风电产业园，本地化率超60%，带动当地就业。在标准输出方面，依托IEC/TC 82（太阳能光伏）、IEC/TC 105（燃料电池）平台，主导制定IEC 62548（光伏）、IEC 63341（氢能）等国际标准，将国内工程经验转化为国际规则。在市场融合方面，通过EPC总承包带动全产业链出海，沙特阿拉伯红海地区的1.5 GW光伏项目采用中国技术、标准、装备，合同额超50亿美元，实现中国方案的系统性输出。

四、立足新起点，引领新变革：未来十年发展展望

自《中国制造2025》实施10年来，我国电力装备制造业实现了从“跟跑”“并跑”到部分领域“领跑”的历史性跨越，特高压、光伏、风电等技术已达全球领先水平。作为现代化产业体系的重要支柱，电力装备制造业兼具传统产业的深厚根基与战略性新兴产业的创新活力，是支撑国家能源安全、实现“双碳”目标、建设能源强国的核心力量。面向未来10年，在全球能源转型加速与地缘政治格局深刻重构的背景下，我国电力装备制造业必须牢牢把握国家的战略指引，以构建新型电力系统为核心场景，系统谋划发展路径。

（一）未来十年的机遇与挑战：场景驱动下的技术需求研判

1. 核心机遇

全球能源转型催生万亿级市场。全球碳中和进程不可逆转，国家能源署预测，2026—2035年全球清洁能源投资将达7.8万亿美元。我国在特高压、智能电网、大容量储能等领域已建立显著先发优势，为龙头企业深度参与全球能源基础设施重构、输出中国方案奠定了坚实基础。

技术融合开辟高附加值新赛道。人工智能、量子计算、先进材料与能源技术深度融合，推动电力装备从“单机设备”向“系统解决方案”跃迁，能源数字化、氢氨耦合、多能互补等新兴业态蓬勃发展。氢能、核聚变被明确为“未来产业”，为企业向系统集成和能源服务商转型提供了广阔空间。预计到2035年，电力装备服务市场规模将达2万亿元，价值链正从单一设备制造向“装备+服务+数据”的全生命周期延伸。

国家战略提供强大牵引力。我国对“加快建设新型能源体系”[21]的坚定决心，为产业发展提供了明确的政策预期和庞大的内需市场[7]。“沙戈荒”大型风光基地、沿海核电、分布式智能电网、全域抽水蓄能等重大工程的建设，将为国内电力装备企业提供最前沿的试验场和应用场景。在“双碳”战略下，新能源装备及清洁能源装备需求旺盛，机械工业产品电气化水平将进一步提升，催生高效发电设备和节能与储能技术装备技术创新、产品升级换代[22]。

2. 严峻挑战

（1）国际竞争格局剧烈重构带来的供应链安全挑战

美国、欧洲分别通过《芯片与科学法案》《关键原材料法案》等政策在关键技术和核心材料上对中国进行遏制。具体业务场景风险凸显：在海上风电领域，欧洲要求2030年前本土制造比例不低于60%，直接影响我国风机出口；在储能领域，美国《通胀削减法案》规定采购中国电池组件的储能项目无法获得补贴，导致2024年我国储能系统在美国的市场份额骤降。供应链安全压力传导至装备环节：高端绝缘材料（如220 kV以上等级XLPE绝缘料）进口依赖度仍超70%，功率半导体器件国产化率仅为62%，且集中在中低压等级，高压大功率IGBT及SiC MOSFET模块对外依存度高。一旦国际供应链中断，将直接导致特高压工程延期、大容量储能系统成本激增。

（2）新型电力系统场景化挑战倒逼装备技术极限突破

高比例新能源消纳场景：2030年风光发电装机将超2.5×10^9 kW，占比超40%，其波动性与随机性对装备提出极端要求。在“沙戈荒”基地，要求直流输电装备具备高海拔、大温差环境适应性，换流阀损耗需再降15%以提升整体效率；在分布式光伏渗透率达80%的县域电网，要求配电装备具备毫秒级电压支撑能力，传统机械开关响应速度已无法满足，必须突破固态断路器超快速开断技术。深远海能源开发场景：远海风能资源技术可开发量超1×10^9 kW，但深远海的场址占比超60%。现有固定式风机在深水区域已接近技术经济

极限，漂浮式风电装备面临“风机–浮体–系泊–电缆”全系统耦合动力学难题。同时，远海电力送出需采用高电压柔直技术，但海缆绝缘材料、海缆–环境动态耦合设计等核心技术仍未突破，严重制约深远海规模化开发。长时储能调峰场景：2035年储能需求将达200 GW/800 GW·h以上，其中4 h以上长时储能占比超50%。当前锂离子电池经济性储能时长有限，且寿命难以满足20年日内调节运行的要求；压缩空气储能效率待提升；液流电池成本需大幅下降。装备技术不足直接导致系统调节能力缺口，预计2030年调峰容量缺口将达5×10^7 kW，威胁电力系统安全。终端电气化能效场景：工业领域电气化率将从当前的30%提升至2035年的50%，但IE3以下低效电机占比仍超60%，在网运行的变压器还有50%未能达到现行国家能效标准要求。钢铁、化工等高耗能行业需要超高温电加热装备，现有技术无法满足氢冶金、绿氢化工等深度脱碳场景需求。

（3）产业基础高级化滞后制约高端装备迭代

部分关键材料和核心器件存在代际差距：大尺寸硅片进口依赖度高，应用于特高压直流套管的纳米级高纯粉体材料国产化率不足；氢燃料电池质子交换膜国产产品寿命与国际水平差距显著。在制造工艺方面，特高压变压器用硅钢片厚度已达极限，需进一步突破超薄规格、低损耗和低噪音硅钢片制造技术；重型燃气轮机叶片单晶铸造合格率较低，导致自主燃机成本居高不下。这些基础环节的滞后，使得高端装备面临“无米之炊”困境，技术迭代周期被迫延长。

（二）未来十年战略重点：聚焦核心，系统突破

面向2035年新型电力系统构建目标，电力装备发展战略必须紧扣系统各环节业务需求，聚焦五大重点领域进行分类突破。此分类逻辑源于新型电力系统“源网荷储”基本架构的深化拓展：可再生能源发电装备解决“源”的清洁化与高效化问题；智能电网装备构建“网”的灵活性与韧性；新型储能装备和先进氢能装备共同构成“储”的长时调节与跨季节平衡能力，其中氢能因其化学储能特性独立成章；节能与终端电气化装备推动“荷”侧能效提升与再电气化。五大领域既各有侧重，又通过多能互补、氢电耦合、“源网荷储”协同形成有机整体。

1. 可再生能源发电装备：从规模领先到全场景深度适配

（1）风电装备：突破深远海技术天花板

陆上风电聚焦“沙戈荒”基地场景，重点攻关15兆瓦级智慧机组，突破150米级柔性叶片设计理论，开发长寿命碳纤维复合材料体系；攻克高叶尖线速带来的气动弹性失稳难题，提升20%低风速区域发电量。

海上风电是战略制高点。固定式海上风电实现18~20兆瓦级机型批量化，突破超长叶片设计，开发耐盐雾腐蚀防护体系；攻克超高扭矩密度传动技术，提升发电机功率密度。漂浮式海上风电需突破装备系统级难题：开发适配20 MW+风机的漂浮平台，突破全系统耦合动力学建模与主动阻尼控制技术；攻克动态海缆疲劳寿命评估与强化技术，实现海缆弯曲半径在小于5倍直径下寿命超过25年，支撑远海风电规模化开发。到2035年，漂浮式风电装备实现商业化应用，支撑远海风能开发规模超5×10^7 kW。

（2）光伏装备：效率与成本双极限突破

晶硅电池技术持续迭代。TOPCon电池量产效率突破27%，开发硼掺杂选择性发射极技术提升开路电压；通过无主栅封装（0BB）等技术大福降低银浆耗量。HJT电池效率达27.5%，突破国产低成本银包铜浆料量产技术；开发超薄硅片切割技术降低硅成本。

颠覆性技术加速产业化。钙钛矿／硅叠层电池效率>32%，攻关大面积薄膜均匀性制备技术；解决紫外光照下环保难题，开发无铅／低铅钙钛矿体系。到2030年实现中试线量产，2035年建成10吉瓦级生产线，度电成本降至0.15元/(kW·h)以下。组件装备配套开发，光伏玻璃减薄至1.6 mm且提升透光率，背板材料耐候性提升至30年。

（3）水电装备：超高水头与变速抽蓄

常规水电突破1000米级超高水头冲击式水轮机，攻克“喷嘴–转轮–机壳全流道多相流–结构耦合”设计难题，提升转轮效率；开发高强度抗磨蚀不锈钢材料，使转轮寿命延长一倍。

抽水蓄能重点攻关300~400 MW变速机组，突破双馈异步电机宽范围高效运行技术，效率提升3~5个百分点；攻克进水阀超高压力密封技术，实

现快速启停。到2035年，变速抽蓄装机占比从当前的不足5%提升至30%，为新能源提供分钟级快速响应能力。

2. 传统能源发电装备：高效灵活，绿色清洁

（1）煤电装备：“新一代煤电”升级改造

进一步优化锅炉燃烧组织和传热控制调节能力，提升机组高效调节技术水平[23]。重点推进煤电深度调峰和快速变负荷智能控制技术创新攻关。

煤气化燃料电池发电（IGFC）等新型煤电技术具备一定应用条件，煤电行业向零碳煤电或负碳煤电转型深入推进。

（2）气电装备：自主可控能力与深化绿色制造

建立健全从部件到整机的全链条测试试验平台。开发复杂仿真技术、全尺度燃气轮机数字孪生技术。100%国产化F级重型燃气轮机热端部件具备市场化能力。建立健全高温部件新材料开发能力、探索和应用复杂结构体新工艺、新制造技术。

推动和实现重型燃气轮机高掺氢比例的技术开发和产业示范。

3. 先进核能与氢能装备：布局未来能源新赛道

（1）核能装备：从第三代自主到第四代“领跑”

第三代核电实现“华龙一号”“国和一号”批量化建设，缩短主泵、蒸汽发生器等关键设备制造周期；开发智能化运维系统，通过数字孪生实现设备寿命预测，降低非计划停堆率。第四代核电加速产业化：钠冷快堆攻克钠火防护与钠水反应检测技术。全面实现人工智能等新技术与控制的融合，实现人机融合、智能控制、无人值守。建立完善的高温气冷堆、小堆制造体系。

核聚变装备开展关键部件预研：第一壁材料需承受>10 MW/m^{2}热负荷，开发钨纤维增强铜基复合材料；超导磁体攻克Nb_3Sn超导股线高临界电流密度技术。

（2）氢能装备：全链条成本攻坚

通过技术进步叠加规模化量产有效降低质子交换膜电解水技术（PEM）电解槽投资成本、提升阴离子交换膜电解槽（AEM）电流密度以及降低高温固体氧化物电解水技术（SOEC）制氢电耗。实现光解制氢、海水制氢、核能制氢等新型制氢技术从实验室研发阶段过渡到商业化应用阶段。

持续开展光解水制氢、氢脆失效、低温吸附、泄漏/扩散/燃爆等氢能科学机理，以及氢能安全基础规律研究。持续推动氢能先进技术、关键设备、重大产品示范应用和产业化发展，构建氢能产业高质量发展技术体系[24]。

4. 智能电网[25]装备：构建新型电力系统的“坚强骨架”

（1）特高压与柔性直流装备：继续攻关

常规特高压直流研制±800 kV/1200万千瓦级设备，提升换流阀单阀组容量；攻克高温大负荷下晶闸管低通态压降技术，降低损耗；开发换流变现场组装技术。柔性直流攻关±1100 kV/1500~2000万千瓦级技术，突破IGBT器件串联均压技术，提升换流阀功率密度；开发架空线用直流断路器，解决直流电网故障隔离难题。到2035年，柔性直流在海上风电送出占比>80%，成为“沙戈荒”基地外送首选技术。

（2）智能配电网装备：实现分布式资源即插即用

一二次融合设备研发电磁式与电子式传感器一体化设计，提升测量精度；开发智能馈线终端（FTU），实现快速故障定位与隔离。柔性配电装备突破10 kV（35 kV）固态变压器（SST），实现分布式光伏与储能柔性接入，效率>98.5%。智能感知部署广域测量系统，同步精度<1 μs；开发配网数字孪生系统，实现预测性维护。到2035年，99.8%变电站实现无人值守，配网自愈覆盖率>99%。

（3）海洋输电装备：开辟远海能源新通道

海洋输电是深远海能源开发的命脉，装备技术面临海水腐蚀、海底地形、动态载荷等独特挑战。海底电缆系统需突破三大核心技术：绝缘材料攻关500 kV及以上XLPE绝缘料国产化和海缆软接头技术，提升绝缘料纯净度与介电强度，实现海缆长度从50 km向150 km跨越，支撑远海风电场电力送出。利用“海缆–环境耦合开发海缆–海床–水动力耦合”动力学模型，精确模拟极端工况下动态载荷；研制海缆故障精确定位装备，大幅缩短修复时间。海缆敷设装备攻克高精度犁埋敷缆船技术，提升敷缆速度与埋深；开发水下机器人（ROV）在线监测与维护系统，实现海缆运行状态实时感知。

（4）新型电力电子装备：推动电网柔性化变革

SiC/GaN器件开发3.3 kV/50 A SiC MOSFET模块，开关损耗较硅基器件显著降低；攻克8 in SiC

衬底低缺陷密度技术。应用于10 kV固态断路器，实现超快速开断。深化6.5 kV/4 kA IGCT在柔直换流阀的应用，开发反向导通型IGCT（RC-IGCT），提升集成度。

5. 新型储能装备：构建多时间尺度调节体系

（1）电化学储能装备：寿命与成本极限优化

寿命与成本极限优化锂离子电池使循环寿命>12 000次，能量转换效率>95%，显著降低能耗与成本。到2035年，储能系统度电成本<0.1元，实现平价应用。

钠电池在−40 ℃的容量保持率≥90%、45 ℃ 100%放电深度（DOD）循环寿命≥15 000次；实现5 MW电池集装箱零辅源运行（无冷却机组），宽温域下系统热稳定性达标、储能系统寿命大于25年，一体化系统能量转换效率≥94%。

（2）长时储能装备：突破经济性瓶颈

钒液流电池攻关高活性电解液配方，提升能量密度；开发离子膜国产化技术，降低成本。到2030年，4 h系统成本降至1.0元/（W·h），在电源侧调峰占比提升至15%。

压缩空气储能突破绝热压缩技术，系统效率提升至72%；开发盐穴储气库快速密封技术，缩短建设周期。到2035年，100兆瓦级以上项目装机超20 GW，成为长时储能主力。

飞轮储能开发磁悬浮轴承技术，提升能量密度；攻克真空长期维持技术。提供秒级调频服务，2035年装机规模>5 GW。

6. 节能与终端电气化装备：深度挖掘系统能效潜力

（1）电机与变压器

全面实现电机系统能效跃升，IE4及以上超高效电机成为市场主流，占比超过70%，并加速向IE5/IE6迈进。重点突破无稀土或少稀土永磁材料体系，发展轴向磁通、多相集成、轮毂直驱等高功率密度、轻量化新结构；深度融合人工智能、数字孪生与边缘计算，构建具备自感知、自诊断和自优化能力的智能电机系统。核心产品涵盖超高效EC风机电机、人形机器人高动态关节电机、eVTOL航空级高功率密度电机及平台化模块电驱总成，有力支撑新能源汽车、先进制造、低空经济与航空航天等未来产业。变压器领域聚焦“零损耗、零污染”方向，规模化应用非晶合金立体卷铁芯配电变压器，空载损耗较传统产品降低60%以上；全面推进天然酯、合成酯等生物基绝缘介质在干式和液浸变压器中的应用，显著降低碳足迹。关键技术包括高磁感取向硅钢、高温超导绕组、高频软磁复合材料、AIoT驱动的全生命周期状态监测，以及高度集成的模块化紧凑设计，产品广泛覆盖新型电力系统关键节点——包括风光大基地升压站、特高压柔性直流换流站、超算与人工智能数据中心、超充网络及高速轨道交通。

（2）终端电气化专用装备

面向工业、交通与数字基础设施全面电气化与近零碳转型[26]，2035年将建成以高效电能替代化石能源的核心技术体系。在工业领域全面推广等离子体炬、高频感应与微波复合加热等新一代电热技术，稳定实现超高温工艺，支撑绿氢直接还原炼铁、零碳化工及高端材料制备；同步突破连续式碳纤维石墨化装备，实现更高温区、更高能效与智能化控制。交通电气化迈向兆瓦级时代，部署充电功率≥1 MW的超快充基础设施，支持重卡、船舶及飞行器电动化，并实现高效率、高安全性的动态无线充电系统商业化应用。数据中心全面采用效率≥98.5%的模块化不间断电源与锂电储能一体化电源系统，淘汰铅酸电池，大幅提升空间与能源利用效率。

五、结语

（一）结论

中国电力装备制造业在过去10年实现了历史性跨越，其意义远超产业自身发展，已成为重构国家能源供应体系、保障能源安全与推动绿色转型的核心战略力量。这一制造能力的全面突破，直接决定了国家能源体系的形态、韧性与未来。

电力装备制造业的自主化突破，从根本上筑牢了国家能源供应的安全底线。曾经受制于人的核电主泵、特高压换流阀、高端绝缘材料等关键环节，如今国产化率普遍超过90%。这意味着从发电（核电、水电、煤电）、输电（±1100 kV高压）到用电的全链条核心装备，均已实现自主可控。我国庞大的电力系统不再依赖外部供应链，有效规避了“断链”风险，将能源安全的命脉牢牢掌握在自己手中，为经济社会稳定运行构筑了最坚实的工业屏障。

电力装备制造业的技术引领，直接驱动了国家能源供应体系的绿色低碳重构。装备是能源转型的物理载体。正是依托全球领先的风电、光伏电池和储能电池等装备制造能力，我国才得以建成全球规模最大的清洁发电体系。同时，柔性直流输电、智能电网等先进输变电装备的大规模应用，有效解决了高比例新能源并网带来的波动性与消纳难题，使“源网荷储”协同成为可能。电力装备制造业的全面突破，支撑了我国能源结构的转型。

电力装备制造业的系统集成能力，成功破解了国家能源资源与负荷逆向分布的根本矛盾。面对“西电东送”的巨大挑战，我国电力装备制造业不仅提供了全球电压等级最高、输送容量最大的特高压直流工程全套装备，更形成了从技术研发、装备制造到工程建设、标准制定的完整产业生态。这一体系化的“超级工程”能力，将西部丰富的清洁能源高效输送到东部负荷中心，实现了全国范围内的能源优化配置，从根本上重塑了国家能源供应的空间格局与效率边界。

特别值得关注的是，海洋输变电装备正成为我国电力装备体系的重要增长极。随着深远海风电加速开发，高压海底电缆、动态缆、海上升压站及敷设运维装备的技术突破，推动能源输送从陆域迈向深蓝。重点攻克高电压等级海缆绝缘材料、超长距离可靠敷设、智能在线监测与故障定位等核心技术，不仅有力支撑海上风电规模化、集群化发展，更开辟了海洋能、海上制氢等多能融合的新赛道，显著拓展我国电力装备制造业的战略纵深，并在全球海洋能源竞争中赢得先机。

十年磨一剑，中国电力装备制造业已从“制造大国”迈向“制造强国”，其成就不仅体现在产值与规模，更在于它已成为国家能源战略的“压舱石”、绿色转型的“推进器”和全球合作的“金名片”。站在新起点，这一战略性产业将继续为保障国家能源安全、推动高质量发展、构建人类命运共同体提供强大而持久的动力支撑。

（二）启示

我国电力装备制造业的发展路径为后发国家制造业升级提供了新范式。与传统装备强国的“技术推动型”发展模式不同，“政策引导+创新驱动+市场拉动+生态协同”的联动模式，实现了跨越式发展。这一模式的核心在于将国家战略需求与市场机制有机结合，通过重大工程为创新提供应用场景，值得后发国家借鉴。

全球领先地位的巩固需要处理好“自主创新与国际合作”的辩证关系。在“卡脖子”环节必须坚持自主创新，掌握发展主动权；同时要以开放心态参与全球产业链分工，通过国际合作提升创新效率。未来需要构建“自主可控+开放协同”的全球产业链体系，在保障安全的前提下提升全球资源配置能力。

技术创新仍是未来发展的核心驱动力。随着全球能源转型加速和技术变革深化，电力装备领域的竞争将更加激烈。只有保持持续的研发投入，加强基础研究和原始创新，才能在技术迭代中保持领先地位。同时，要警惕技术路径依赖，及时布局颠覆性技术，避免错失发展机遇。

能源装备创新需前瞻布局新兴战略领域。深远海能源开发已成为制胜关键，掌握海底电缆及敷设核心技术，就是掌握海洋能源主动权。亟需在高端材料、动态建模、专用船舶等方向持续投入，构建“材料–装备–工程–服务”全链条能力。

全球能源转型为我国电力装备制造业提供了广阔舞台。我国电力装备的技术优势与全球能源转型的需求高度契合，未来应通过技术输出、标准输出、服务输出，为全球能源转型提供中国方案。同时，要积极应对国际竞争和地缘政治风险，通过深化国际合作、完善全球布局，实现与全球伙伴的共赢发展。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: December 30, 2025; **Revised date:** February 3, 2026

Corresponding author: Hou Rui is a professor-level senior engineer from the Machinery Industry Technology Development Foundation. His major research fields include science and technology policy and industry management. E-mail: horui2000@163.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on the Second Phase (2025—2035) in Boosting China’s Strength in Manufacturing Development” (2025-PP-01), “Research on Technology Roadmap of Key Areas of China’s Manufacturing Industry” (2025-HZ-10)

参考文献

[1] 中华人民共和国国务院. 中国制造2025 [R]. 北京: 中华人民共和国国务院, 2015.
State Council of the People’s Republic of China. Made in China 2025 [R]. Beijing: State Council of the People’s Republic of

China, 2015.

[2] The Office of Senator Marco Rubio. The world China made: “Made in China 2025” nine years later [R]. Washington DC: The Office of Senator Marco Rubio, 2025.

[3] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 碳达峰碳中和的中国行动 [N]. 人民日报, 2025-11-09(04).
State Council Information Office of the People’s Republic of China. China’s actions on carbon peak and carbon neutrality [N]. People’s Daily, 2025-11-09(04).

[4] 中国核能行业协会, 中核战略规划研究总院有限公司, 中智科学技术评价研究中心. 中国核能发展报告 [R]. 北京: 中国核能行业协会, 2025.
China Nuclear Energy Industry Association, China Nuclear Strategic Planning and Research Institute Co., Ltd., China–Zhili Science and Technology Evaluation Research Center. China nuclear energy development report [R]. Beijing: China Nuclear Energy Industry Association, 2025.

[5] 陈瑶.“动力心脏”添绿能 [N]. 中国纪检监察报, 2025-11-10(08).
Chen Yao. The “power heart” adds green energy [N]. China Discipline Inspection and Supervision News, 2025-11-10(08).

[6] 黄晓芳. 浩瀚海洋大有可为 [N]. 经济日报, 2024-12-03(06).
Huang X F. The vast ocean holds great potential [N]. Economic Daily, 2024-12-03(06).

[7] IEA.World energy outlook 2025 [R]. Paris: IEA, 2025.

[8] 侯睿, 祁卓娅, 王婧. 机械工业应对“双碳”的机遇与挑战 [J]. 科学通报, 2024, 69(8): 997–1004.
Hou R, Qi Z Y, Wang J. Opportunities and challenges for the mechanical industry in response to carbon peaking and carbon neutrality [J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(8): 997–1004.

[9] 全球能源互联网发展合作组织. 全球电力发展转型报告 2025 [R]. 北京: 全球能源互联网发展合作组织, 2025.
Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization. Global power development and transformation report 2025 [R]. Beijing: Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, 2025.

[10] BNEF. Energy transition investment trends 2025 (abridged report) [R]. London: BNEF, 2025.

[11] IIM 信息. 智能变电站保护控制一体化装置产业发展白皮书 [R]. 北京: IIM 信息, 2025.
IIM Information. White paper on the development of integrated protection and control devices for smart substations [R]. Beijing: IIM Information, 2025.

[12] 伍玲. “智”造清洁能源为绿色地球贡献“中国方案”——写在 2025 世界清洁能源装备大会开幕之际 [N]. 德阳日报, 2025-09-17 (01).
Wu L. Intelligently manufacturing clean energy to contribute “Chinese solutions” for a greener planet—On the occasion of the opening of the 2025 World Clean Energy Equipment Conference [N]. Deyang Daily, 2025-09-17(01).

[13] 美国中国总商会. 在美中资企业年度商业调查报告 [R]. 华盛顿: 美国中国总商会, 2025.
China General Chamber of Commerce. Annual business survey report of Chinese enterprises in the United States [R]. Washington DC: China General Chamber of Commerce, 2025.

[14] 中国机械工业联合会. 2021 年机械工业经济运行形势分析及 2022 年趋势预判 [J]. 电器工业, 2022 (2):4–6.
China Machinery Industry Federation. Analysis of the economic operation situation of the machinery industry in 2021 and trend forecast for 2022 [J]. Electrical Industry, 2022 (2): 4–6.

[15] IEA. Building the future transmission grid [R]. Paris: IEA, 2025.

[16] 林水静. 新能源装备出口“软硬兼修” [N]. 中国能源报, 2025-09-22(09).
Lin S J. “Soft and hard” in new energy equipment exports [N]. China Energy News, 2025-09-22 (09).

[17] 赵龙成. 中国能源绿色发展成为全球能源转型引擎 [J]. 生态经济. 2024, 40(11): 9–12.
Zhao Longcheng. China’s green energy development becomes the ngine of global energy transition [J]. Ecological Economics. 2024, 40(11): 9–12.

[18] 工业和信息化部, 财政部, 金融监管总局. 关于进一步完善首台(套)重大技术装备首批次新材料保险补偿政策的意见 [R]. 北京: 工业和信息化部, 财政部, 金融监管总局, 2024.
Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Finance, China Banking and Insurance Regulatory Commission. Opinions on further improving the insurance compensation policy for the first batch of new materials in major technical equipment [R]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Finance, and China Banking and Insurance Regulatory Commission, 2024.

[19] 许晓敏, 蒋晓雨, 李湘颖. 电力装备制造企业多价值链协同成本控制 [J]. 科学技术与工程. 2025, 25(25): 10735–10748.
Xu X M, Jiang X Y, Li X Y. Multi-value chain collaborative cost control in electric power equipment manufacturing enterprises [J]. Science Technology and Engineering. 2025, 25(25): 10735–10748.

[20] 国家市场监督管理总局. “一带一路”10 周年标准化成果报告 [R]. 北京: 国家市场监督管理总局, 2025.
State Administration for Market Regulation. Report on standardization achievements of the “Belt and Road” initiative’s 10th anniversary [R]. Beijing: State Administration for Market Regulation, 2025.

[21] 杨荫凯. 加快建设新型能源体系 [N]. 经济日报, 2025-12-15(02).
Yang Y K. Accelerating the construction of a new energy system [N]. Economic Daily, 2025-12-15(02).

[22] 埃森哲. 2023 埃森哲中国企业数字化转型指数 [R]. 北京: 埃森哲, 2023.
Accenture. 2023 Accenture China enterprise digital transformation index [R]. Beijing: Accenture, 2023.

[23] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 新一代煤电升级专项行动实施方案 [R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 国家能源局, 2025.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Implementation plan for the new generation coal power upgrade initiative [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, National Energy Administration, 2025.

[24] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 氢能产业发展中长期规划 (2021—2035 年) [R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 国家能源局, 2022.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Medium-and long-term development plan for hydrogen energy industry (2021—2035) [R]. Beijing: National De-

velopment and Reform Commission, National Energy Administration, 2025.

国家发展和改革委员会, 国家能源局. 氢能产业发展中长期规划(2021—2035 年) [EB/OL]. (2022-03-23)[2025-11-20]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220323_1320038_ext.html.

National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Medium-and long-term development plan for hydrogen energy industry (2021—2035) [EB/OL]. (2022-03-23)[2025-11-20]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220323_1320038_ext.html.

[25] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 关于促进电网高质量发展的指导意见 [R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 国家能源局, 2025.

National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Guidelines on promoting high-quality development of power grid [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, National Energy Administration, 2025.

[26] 绿色和平. 迈向“十五五” 煤电何去何从: 转型路径与多元机制研究 [R]. 北京: 绿色和平, 2025.

Greenpeace. Toward the 15th Five-Year Plan: The future of coal power—Research on transformation paths and diversified mechanisms [R]. Beijing: Greenpeace, 2025.