

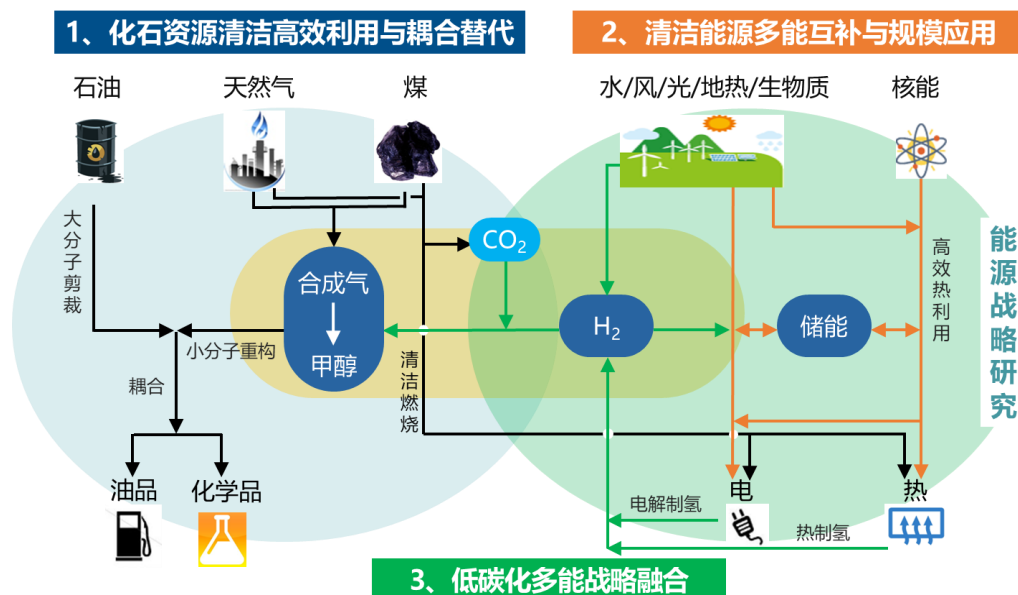
“变革性洁净能源关键技术与示范” A 类先导专项

“面向国家能源结构变革战略研究” 课题



# 洁净能源科技动态监测快报

2020 年第 08 期（总第 10 期）



## 本期看点

- DOE 资助上亿美元开发先进燃煤发电及煤制氢技术
- 美国西南研究院 10 MW 超临界 CO<sub>2</sub> 示范电站建设完工
- 欧洲电池技术创新平台提出 2021-2023 年研发创新优先事项
- 欧盟海洋能战略研究与创新议程提出至 2025 年优先研发主题
- 欧盟发布能源系统集成战略打造绿色智慧综合能源系统
- 欧盟委员会发布欧洲氢能战略提出三步走路线

中国科学院洁净能源创新研究院  
中国科学院武汉文献情报中心

# 目 录

2020 年第 08 期 (总第 10 期)

## ◆ 化石资源清洁高效利用

- DOE 资助上亿美元开发先进燃煤发电及煤制氢技术..... 2
- 美国西南研究院 10 MW 超临界 CO<sub>2</sub> 示范电站建设完工 ..... 3

## ◆ 清洁能源多能互补

- 欧洲电池技术创新平台提出 2021-2023 年研发创新优先事项 ..... 4
- 欧盟海洋能战略研究与创新议程提出至 2025 年优先研发主题..... 8
- DOE 资助 1.39 亿美元支持先进车辆技术研发..... 13
- DOE 资助 6500 万美元支持先进核能技术研发..... 15
- 基于半导体制造新工艺制备大面积柔性单晶钙钛矿薄膜..... 17

## ◆ 低碳化多能融合

- 欧盟发布能源系统集成战略打造绿色智慧综合能源系统..... 19
- 欧盟委员会发布欧洲氢能战略提出三步走路线..... 22
- DOE 资助 6400 万推进氢能规模化应用技术研发..... 25
- 新型异质结质子传导材料将燃料电池质子迁移率提升百倍..... 26

## ◆ 能源战略研究

- 国际能源署能源技术展望报告评估洁净能源技术创新需求..... 28
- IEA: 全球电动汽车市场兴旺 未来十年发展前景可期..... 30

## 本期概要

美国能源部 (DOE) 宣布在“Coal FIRST”计划下投入 1.18 亿美元，支持开发先进的小型、灵活碳中性燃煤发电及其无碳制氢技术：其中，资助 3700 万美元开发未来先进燃煤电厂的关键组件：间接超临界二氧化碳 (sCO<sub>2</sub>) 发电循环的燃煤锅炉主加热器设计的测试和建模优化，sCO<sub>2</sub> 涡轮机高温密封件，零排放合成气燃烧器测试，用于先进 sCO<sub>2</sub> 循环的煤基合成气富氧燃烧涡轮机，超高效氢气生产/碳捕集的先进陶瓷膜/模块，高效模块化燃烧前碳捕集系统，模块化分级增压富氧燃烧发电厂的关键组件；8100 万美元支持未来先进燃煤电厂概念的设计开发和系统集成研究：灵活的超临界燃煤发电厂，超临界蒸汽循环增压流化床发电厂，燃气轮机-超临界燃煤锅炉混合电厂，灵活的煤-生物质气化。

欧洲技术与创新平台“电池欧洲” (Batteries Europe) 发布了《欧洲电池行业短期研发创新优先事项》，针对欧洲电池创新价值链提出了短期 (2021-2023 年) 的 7 大优先创新研发事项，包括：电池原料可持续加工和安全供应保障；开发新材料增强储能电池性能；将欧洲打造成全球电池制造业的领导者；交通动力电池储能技术；支持固定式储能和电动汽车用储能设施部署；电池回收；培育新兴电池技术。旨在通过加速技术研发创新推动完善电池产业布局，以构建一个具有全球竞争力的欧洲电池产业。

欧洲海洋能技术与创新平台 (ETIPOCEAN) 发布《海洋能战略研究与创新议程》，明确了 2021-2025 年将实施的关键研究创新优先事项，涵盖了 6 大主题领域，包括：海洋能设备设计与验证；基座、连接与系泊装置；海上物流及运行；能源系统集成；数据收集、分析和建模工具；交叉研究领域。

欧盟委员会发布《能源系统集成战略》，提出了打造安全高效绿色智慧综合能源系统战略目标，并为此制定了 38 项行动计划，包括：修订立法、财政支持、新技术和数字化工具的研究和部署、指导成员国的财政措施和逐步取消化石燃料补贴、市场治理改革和基础设施规划、改进消费者的信息获取等方面。

欧盟委员会发布了《欧洲氢能战略》，提出了推动欧盟氢能规模化应用的“三步走”路线：(1) 第一步 (2020-2024 年)，氢能发展的目标是降低现有制氢过程的碳排放并扩大氢能应用领域，将其从现有的化学工业领域扩展到其他领域；(2) 第二步 (2024-2030 年)，使氢能成为综合能源系统的重要组成部分；(3) 第三步 (2030-2050 年)，可再生能源制氢技术将逐渐成熟，其大规模部署将可以使所有脱碳难度系数高的工业领域使用氢能代替。

国际能源署 (IEA) 发布了《全球电动汽车展望 2019》报告，系统分析了全球电动汽车市场的发展现状和未来的发展潜力：2019 年，全球电动汽车销售数量超过 210 万辆，创新历史新高，使得全球电动汽车累计保有量提升至 720 万辆，同比增长 40%。其中中国市场保有量高达 335 万辆，占全球总量的近一半，是全球最大的电动汽车市场。电动汽车的发展有助于减少碳排放，2019 年电动汽车的使用减少了近 5300 万吨的二氧化碳排放量。到 2030 年电动汽车“从井到轮”全生命周期排放量都将远低于内燃机汽车排放量：在既定政策情景下将减排一半，而在可持续发展情景下将减排 2/3。

# 化石资源清洁高效利用

## DOE 资助上亿美元开发先进燃煤发电及煤制氢技术

7月17日，美国能源部（DOE）宣布在“Coal FIRST”计划下投入1.18亿美元<sup>1</sup>，支持开发先进的小型、灵活碳中性燃煤电厂，以及基于该类电厂的无碳制氢技术。其中，3700万美元支持7个选定项目开发未来先进燃煤电厂的关键组件；总额8100万美元的招标公告支持先进燃煤电厂概念的设计开发和系统集成研究。

### 1、未来先进燃煤电厂的关键组件开发

资助3700万美元支持7个选定的研发项目，具体包括：（1）用于间接超临界二氧化碳（sCO<sub>2</sub>）发电循环的燃煤锅炉主加热器设计的测试和建模优化，探索将新型sCO<sub>2</sub>循环与燃煤锅炉主加热器集成以提高燃料效率和成本效益；（2）sCO<sub>2</sub>涡轮机高温密封件开发，将开发用于100兆瓦sCO<sub>2</sub>涡轮机的高温干气密封组件技术，通过减少泄漏和提高爬坡率来提高效率；（3）零排放合成气燃烧器测试，将设计、制造和测试世界首个用于Allam-Fetvedt循环、以合成气为燃料的sCO<sub>2</sub>燃烧器，该燃烧器将比传统化石燃料发电成本更低，具有高灵活性、碳捕集能力，以及近零排放和水耗；（4）开发用于先进sCO<sub>2</sub>循环的煤基合成气富氧燃烧涡轮机，将详细设计150-300兆瓦级sCO<sub>2</sub>循环的燃烧煤基合成气、天然气的富氧燃烧涡轮机，在30兆帕下达到涡轮机进口温度1150℃、排气温度725-775℃，用于直燃式sCO<sub>2</sub>发电厂；（5）开发用于先进“Coal FIRST”煤基多联产电厂超高效氢气生产/碳捕集的先进陶瓷膜/模块；（6）先进“Coal FIRST”煤基多联产的高效模块化燃烧前碳捕集系统，将示范气体净化和碳捕集整个过程，包括脱硫系统、高温变换催化剂和高温污染物控制系统；（7）开发模块化分级增压富氧燃烧发电厂的关键组件。

### 2、未来先进燃煤电厂概念的设计开发和系统集成研究

该招标公告共计投入8100万美元支持未来先进燃煤电厂概念的设计开发和系统集成研究，将侧重于工程规模的原型开发，包括对概念原型的设计开发、主场地评估和环境信息数据、投资案例分析以及工程规模原型的系统集成设计。本次招标重点关注四类先进燃煤电厂概念，包括：（1）灵活的超临界燃煤发电厂；（2）超临界蒸汽循环增压流化床发电厂；（3）燃气轮机-超临界燃煤锅炉混合电厂；（4）灵活的煤-生物质气化，用于发电和生产无碳氢气。上述概念原型将用于发电和生产氢气，并包括碳捕集和封存技术。（岳芳）

<sup>1</sup> DOE Invests \$118 Million in 21st Century Technologies for Carbon-Neutral Electricity and Hydrogen Produced from Coal. <https://www.energy.gov/articles/doe-invests-118-million-21st-century-technologies-carbon-neutral-electricity-and-hydrogen>

## 美国西南研究院 10 MW 超临界 CO<sub>2</sub> 示范电站建设完工

7月1日，美国西南研究院（SwRI）宣布其耗资 1.12 亿美元的“超临界转换发电”（STEP）示范电站历时 18 个月正式建设完工<sup>2</sup>，并获批使用证，将示范下一代高效、低成本的发电技术。STEP 示范电站建筑设施占地 22 000 平方英尺，其特点是采用了撬装式组件，能够随着行业发展的要求进行重构设计。该示范电站是由 SwRI、天然气技术研究院（GTI）和通用电气研究院（GE Research）合作设计，目前建筑部分已经完成，正在进行零部件制造和设备安装，计划在 2021 年初开始运行，随后进行综合测试以评估该技术。

传统化石燃料电厂采用水蒸汽循环发电，其效率偏低且灵活性不足，采用高温超临界 CO<sub>2</sub>（sCO<sub>2</sub>）代替水作为热介质能够使效率提高 10%，且 sCO<sub>2</sub> 的高密度特性能够大幅缩减涡轮机尺寸（仅为传统发电厂的 1/10），可减小环境影响和建设成本。该项目将采用 SwRI 的 sCO<sub>2</sub> 涡轮机，其仅有一张书桌大小但产生的功率密度是所有工业涡轮机中最高的，可为 10 000 个家庭供电。这种小型涡轮机可承受光热发电的恶劣运行条件，因此可利用工业废热、太阳能集热器或其他热源发电，并且具备高度可扩展性，最高可达 450 MW。这一技术可使当前最先进的化石燃料蒸汽发电厂效率提高 2%-4%，减少相当于 1400 万辆汽车的 CO<sub>2</sub> 排放量。基于该技术，STEP 项目将示范一个 sCO<sub>2</sub> 集成式发电厂，大幅提升这一技术的规模、效率、经济性、运行灵活性、空间要求和环境性能。

**编者按：**STEP 项目于 2016 年 10 月启动，由 SwRI、GTI、GE Research 和美国能源部国家能源技术实验室（NETL）合作开展，项目为期 6 年分三个不同的预算期实施，第一个预算期是 2016 年 10 月-2018 年 10 月，第二个预算期为 2018 年 11 月-2021 年 1 月，第三个预算期是 2021 年 2 月-2022 年 9 月。项目目标是在德克萨斯州圣安东尼奥设计、建设和运营一个 10 MW 超临界 CO<sub>2</sub> 动力循环示范电站，以验证部件和循环性能、循环可操作性，证明降低电力成本的潜力，热力循环效率大于 50%。

（岳芳 郭楷模）

<sup>2</sup> SwRI COMPLETES CONSTRUCTION ON STEP PILOT PLANT BUILDING.  
<https://www.swri.org/press-release/step-10-megawatt-supercritical-carbon-dioxide-pilot-plant-building>.

# 清洁能源多能互补

## 欧洲电池技术创新平台提出 2021-2023 年研发创新优先事项

7月3日，欧洲技术与创新平台“电池欧洲”（Batteries Europe）发布了《欧洲电池行业短期研发创新优先事项》<sup>3</sup>报告，针对欧洲电池创新价值链提出了短期（2021-2023年）的7大优先创新研发事项，旨在通过加速技术研发创新推动完善电池产业布局，以构建一个具有全球竞争力的欧洲电池产业，助力欧洲气候中性经济目标的实现。7大优先研发事项的主要内容如下：

### 一、电池原料可持续加工和安全供应保障

#### 1、锂

加大对硬岩锂矿床矿物学知识研究，以更好地认知和加工矿物，从而实现从矿物中高效低成本提取锂资源。除了强化锂矿开采过程中副产品采集之外，还需对矿物加工处理过程中使用水和能源方式进行优化，以最大限度地减少尾矿和脉石的产生。确保在锂加工处理厂和矿场附近有随时可以投入使用的可再生能源。鉴于欧洲拥有丰富的尚未利用的锂矿资源，因此应该将锂矿的开发加工处理作为优先事项。

#### 2、镍和钴

开发工艺更加高效、成本更低廉的从低品位矿石中提取镍和钴金属元素新技术，确保提取的金属元素纯度符合电池应用的需求，从而保障欧洲锂电池金属元素供应安全。

#### 3、石墨

由于欧洲大陆天然石墨资源有限，因此需要发展高品质的合成石墨技术，进而替代天然石墨，为欧洲电池产业可持续发展提供最佳解决方案。

### 二、开发新材料增强储能电池性能

#### 1、用于电动汽车领域的 3B<sup>4</sup>型锂电池开发

欧洲开发高电压高容量的 3B 型固态锂电池（高电压、高容量的固态锂电池）必须要解决一系列相关挑战，包括：开发高压正极材料的同时，避免或减少高价元素（例如钴）的使用量；另一方面，依靠先进材料的开发，包括正极、负极、粘合剂、隔膜、电解液、集流体和封装材料，将现有动力锂电池性能提升到接近理论极限水平。

<sup>3</sup> Batteries experts identify short-term research & innovation priorities.

<https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/batterieseuroperesearchandinnovationpriorities-detailedsummary.pdf>

<sup>4</sup> 欧盟电池技术的划分详见战略能源技术计划（SET-PLAN）10大研究创新行动的第7个行动计划内容，即“交通电气化和固定储能”章节内容，内容网络链接为 [https://setis.ec.europa.eu/sites/default/files/set\\_plan\\_batteries\\_implementation\\_plan.pdf](https://setis.ec.europa.eu/sites/default/files/set_plan_batteries_implementation_plan.pdf).

## **2、用于电动汽车领域的 4A 和 4B 型固态锂电池开发**

针对 4A 型电池（基于传统材料的固态锂电池）重点研究内容包括：研制低直流电阻材料，减小负极厚度，开发出高离子电导率的低厚度固体电解质，制备出新的固体电解质中间层，优化电极/固态电解质接触界面以提升电荷迁移速率、电化学稳定性。开发 4B 型锂电池（基于锂金属全固态电池），以进一步提高电池的能量密度和安全性，使之超越现有电动汽车电池性能水平。

## **3、用于固定式储能领域的钠离子电池开发**

欧洲将重点发展基于钠离子电池的固定式储能技术，从该电池正极、负极和电解质等材料的合成和表征到相关材料组装集成，再到完整的软包式钠离子电池开展全方位的研究，目标是开发出比现有商用的固定式储能电池性能更好、但成本更低的钠离子电池。

## **4、用于固定式储能领域的液流电池开发**

重点研究内容包括：开发材料（如氧化还原电对、电解质等）和新电池架构，并验证基于新材料新架构的新型氧化还原液流电池性能和经济性，以确保在获得更高的能量密度、功率密度和寿命情况下，具备更低廉的价格和良好的环保性。

## **三、将欧洲打造成全球电池制造业的领导者**

### **1、具有环境效益和成本效益的电极和电池单元组件制造**

重点研究方向包括：具有环境效益的电极和电池单元组件制造技术，如完全不使用有机溶剂作为浆料分散介质的电极涂布技术、先进的高固含量涂层、完全干法涂层技术等，以降低生产成本，提升电池性能和使用寿命。

### **2、电极和电池智能生产设备**

重点研究内容包括：将智能质量控制系统集成到生产设备、电池性能退化机制模型开发、大数据驱动的性能测试工具开发、电池生产过程的虚拟模拟技术等。

### **3、集成数字孪生技术的电池制造生产线**

重点研究内容包括：开发灵活的制造流程和高精度建模工具，以优化工艺、条件和机器参数；在电池制造过程中开发和验证多重物理量和多尺度模型，能够更加准确了解制造过程的每个步骤；开发基于物理建模和 AI 技术的电池数字化模型，将电池设计和制造设计集成在一起。

### **4、电池制造工厂价值链整合**

欧洲需要全面整合电池工厂价值链，即构建一个深度协同合作网络，将欧洲地区工业规模的电池制造商、电池加工设备公司、原材料和其他相关工业部门进行全面整合，打造欧洲本土化的电池制造业，以抗衡亚洲电池制造商。

## **四、交通动力电池储能技术**

### **1、电池模块和电池组的设计和制造**

欧洲需要重新定义一种电池模块和电池组创新设计以及相关的制造工艺，以减少开发时间和成本并提高性能，同时还要考虑其环境可持续性，如可回收性和碳足迹。

## **2、电池热管理技术**

由于过高或过低的温度都将直接影响动力电池的使用寿命和性能，并有可能导致电池系统的安全问题，为此欧洲必须发展先进的电池热管理技术，提高电池系统的效率、可靠性、使用寿命和安全性。

## **3、发展先进的电池管理技术优化电池利用率**

欧洲需要开发更先进的电池管理技术提升电池利用率，重点研究任务是开发基于知识和数据的电池管理系统，以降低电池系统的总成本，确保在所有操作模式下能够安全高效的使用。

## **4、开发用于电池模块和电池组开发、制造和电池管理的数字孪生技术**

欧洲需要在电池的开发和生产过程中引入数字孪生技术，实现对电池开发、系统设计和制造全流程的高精度模拟，加快研发过程，并提高电池模块和电池组的性能，降低成本。

## **5、电池安全性、性能、可靠性和使用寿命的评估方法和工具**

欧洲需要应用各种技术，如物理特征表征技术、计算机模拟、现场测试或这些技术的组合，来开发新的评估方法和工具，大幅降低电池评估的成本（至少降低 20%-30%）和所需时间（至少减少 20%-30%）。

## **五、支持固定式储能和电动汽车用储能设施部署**

### **1、固定式电力储能系统的安全性**

欧洲需要加强电池制造、应用和防护等环节的电力储能系统安全性研究：一是电池生产制造环节的安全，包括电池材料和生产工艺控制；二是电池应用环节的安全，包括预警、防护和消防等。三是配套设施的安全设计，包括电站隔热和导热设计等方面。

### **2、开放式电池管理系统**

欧洲需要开发电池管理系统对电池及其单元进行智能化管理，防止电池出现过充电和过放电，延长电池的使用寿命，监控电池的健康状态。此外，确保电池管理系统的开放性，即第三方必须有权访问所有必要的电池系统信息、电池状态、操作模式和互操作性条件；从而实现利用上述信息来开发延长电池寿命的解决方案，并演示诊断和预测电池系统寿命健康状态的方法。

### **3、固定式电池储能系统的互操作性**

互操作性和多服务模式运行是电池储能系统优于其他竞争性储能技术的关键支柱，这对灵活使用电动汽车也很重要（电动汽车既可以作为用电终端，也可以作为



供电设备)。欧洲需要将互操作性与合适的电池运行标准、业务模型和技术解决方案相结合,成为电力储能系统、混合储能系统和电动汽车开发的一部分,以实现电池储能系统在上述不同应用场景下服务模式的灵活切换。

#### **4、长时电池储能系统**

依据《绿色协议》,欧洲到 2050 年要实现零排放能源系统目标,波动性太阳能和风能在欧洲能源结构中占比将显著增加,使得高比例集成低碳能源资源的电网稳定性面临挑战,为此欧洲亟需开发长时(储能时长 10 个小时以上)电池储能系统来解决。

#### **5、储能与直流微电网**

直流微电网中直流微电源输出不稳定会造成网内功率不平衡及直流母线电压大范围波动问题,可以通过部署配套的储能系统给予解决。欧洲需要开展基于储能的直流微电网能量管理和电压控制研究、直流微电网储能系统自动充放电改进控制策略研究等。

#### **6、用于固定式储能的退役电动汽车电池的建模和标准化研究**

到 2025 年,欧洲预计会有 29 GWh 电动汽车退役电池能够用于二次回收利用,其中三分之一(10 GWh)可以应用到固定储能领域,实现电池寿命的延长和碳足迹的缩减。欧洲必须开展用于固定式储能的退役电动汽车电池的建模和标准化研究,重点在电池寿命评估方法、电池翻新修复和电池管理方面开展研究。

### **六、电池回收**

#### **1、电池材料回收**

未来 10 年,欧洲大量的储能电池使用寿命到期需要报废处理,欧洲需要在整个欧盟范围内开发一套统一的废旧电池回收处理系统和标准。开发更环保的电池回收处理工艺,以尽量减少能源、水的消耗,以提升有价值化学材料回收率,并尽量减少接触有害物质的几率。

#### **2、电池收集、逆向物流、拆解和分类**

欧洲需要对电池进行系统分类标签,以实现高效的回收流程;需对回收工厂进行改造以处理大量的废电池,并且需要建立从分拣、拆卸到回收的高度自动化过程;发展现代低碳足迹物流。

### **七、培育新兴电池技术**

#### **1、多价离子电池**

未来社会对电池能量密度、比容量的要求越来越高,欧洲需要对新一代高能量密度的多价离子电池进行研究布局,以维持电池技术全球领先地位和为抢占未来的市场积累技术储备。

#### **2、新型液流电池**

欧洲需要开发经济性更加优越的新型液流电池技术，重点围绕新型液流电池技术开展建模、可持续电化学和电池设计、电化学模型设计以进行电池材料和性能的仿真，并辅以实验结果，从而能够以更快、更经济的方式发现最有应用潜力的氧化还原电对，进而更快地开发出更高能量密度、更低价格、更环保和更安全的新型液流电池。

### 3、水系电解质电池

相比于有机电解液，水系电解液具有无毒无害、不可燃、成本低和对生产环境要求低等优点，同时水系电解液的离子电导率要比有机电解液高，极大改善锂离子电池的倍率和快充性能。欧洲需要大力开展低成本、安全先进的水系电解质电池研究。

### 4、新兴的电池界面研究技术

电池界面（固-固、固-液界面等）电化学过程对电池的各方面性能均会产生重要的影响，为此需要对电池界面的电化学过程进行系统研究。欧洲需要研究开发电池界面电化学过程的原位无损表征技术，开展计算机建模以模拟界面的电化学过程，更好地理解电池电化学反应和性能降解衰退的工作机制。

### 5、探索新型负极材料

新兴负极材料的研发成为提升锂电池能量密度的重要方向。欧洲需要开展新型负极材料研发，但不能采用传统的基于人工试错实验方法，应该利用大数据、人工智能技术来开发高通量的实验模拟平台，实现对海量数据的快速解析从而大幅提升新材料的甄别和筛选速率，加快研发进程。

（胡敏 曾焱阳 郭楷模）

## 欧盟海洋能战略研究与创新议程提出至 2025 年优先研发主题

6月19日，欧洲海洋能技术与创新平台（ETIP OCEAN）发布《海洋能战略研究与创新议程》<sup>5</sup>，明确了2021-2025年将实施的关键研究创新优先事项及相应预算（共计10.06亿欧元），旨在推进海洋能技术发展并大幅降低成本，以到2050年实现气候中性欧洲。本次公布的议程重点关注6个领域：海洋能设备设计与验证；基座、连接与系泊装置；海上物流及运行；能源系统集成；数据收集、分析和建模工具；交叉研究领域，共确定了17个优先研发主题及相应的具体行动。主要内容如下：

### 一、海洋能设备设计与验证

1、进行海洋能设备示范以增加实际海况运行经验。该主题将投入1500万欧元，对海岸线、海上固定式及海上浮动式波浪能转换器和潮流能转换器进行示范实验，预计将部署10个大型项目和10个中型项目，使技术从技术成熟度（TRL）5级提升

<sup>5</sup> Strategic Research and Innovation Agenda for Ocean Energy. <https://www.oceanenergy-europe.eu/wp-content/uploads/2020/05/ETIP-Ocean-SRIA.pdf>

至 7 级以上。**具体行动**包括：在欧洲的陆上和海上设施进行测试；示范设备的可扩展性；优化动力输出装置关键部件；全尺寸设备的真实海上长期部署；确定性能、可靠性、可用性、可维护性和生存性的关键性能指标；促进知识转让和跨部门合作；进行标准预研究，提供指南和技术规格以协助认证过程。

**2、海洋能试点电站示范。**该主题将投入 3500 万欧元，对波浪能和潮流能发电进行长期试点示范，预计将部署 7 个试点项目，使技术从 TRL 7 级提升至 8-9 级。**具体行动**包括：在小型试点示范全尺寸波浪能和潮流能装置；示范设备间的交互；优化共用的电气部件，如电力电缆、变电站等；示范其他潜在共用设备，如基座和系泊线缆；优化安装程序和方法，如船舶、遥控车辆和设备；示范改进的制造和装配技术；优化运行和维护技术，包括数据分析和其他数字技术；确定波浪能/潮流能阵列的性能、可靠性、可用性、可维护性和生存性关键性能指标；促进知识转让和跨部门合作；通过监测活动更好地了解环境影响；社会经济影响评估；发电质量与能源系统集成研究；集成储能技术或与其他用途结合，如制氢、海水淡化或其他海上可再生能源；标准预研究，提供指南和技术规格以协助发电阵列的认证过程。

**3、动力输出装置及控制系统的改进和示范。**该主题将投入 6000 万欧元，改进并示范动力输出装置和控制系统，以提高转换器效率和可靠性，避免在极端事件时造成损坏。预计将部署 10 个中等规模的高 TRL 试点项目和 5 个小规模中等 TRL 试点项目，使部分技术从 TRL3 级提升至 6 级，部分从 TRL 4-5 级提升至 7-8 级。**具体行动**包括：示范动力输出装置和控制系统的可靠性、稳健性和性能；通过关键部件的标准化、模块化和可扩展化，优化和简化动力输出装置；验证“波浪到电网”模型<sup>6</sup>，以促进海洋能装置的优化；改进控制策略以减少输入随机性的影响（例如，减少极端负荷，增加产量）；对关键部件的载荷和强度进行不确定性评估，以确定寿命、安全系数和可靠性；示范符合电网要求的电力供应，包括短期储能解决方案，以确保平稳输出电力；增进对扩大动力输出部件规模的限制因素的认识；增强技术开发人员和关键供应商之间的合作，以开发系统之间的互操作性（例如监督控制和数据采集系统要求的标准化和统一）；标准预研究，提供指南和技术规格以协助认证过程。

**4、其他部门创新材料的应用。**该主题将投入 2500 万欧元，验证其他海洋应用中的耐腐蚀和重载荷的材料及涂层在海洋能设备中的可用性。预计将部署少量中等规模和 5 个小规模试点项目，使技术从 TRL5 级提升至 7 级。**具体行动**包括：将创新材料、防污涂料和制造工艺用于多种海洋能装置和过程；创新材料性能表征和实验测试；示范材料在海水中的长期耐久性（理想情况下直至设备退役）；进行运行环境的示范以了解材料/涂层的生存能力并降低风险。

---

<sup>6</sup> “波浪到电网”是指从波浪与发电设备间的水动力作用到并入电网的整个能量转换链。

**5、开发新型波能装置。**该主题将投入 4500 万欧元，开发新波浪能概念，大幅改进关键设备（如能量捕获和转换装置）的性能。预计将部署 5 个中等规模和 10 个小规模试点项目，使技术从 TRL 3 级提升至 6 级。**具体行动**包括：新波浪能概念和子系统的数值模拟和仿真，与当前技术相比应表现出跳跃式变化；针对全球环境在实验室（原型）对新概念进行实验验证；相关环境中的技术示范；通过规模试验验证阶段进展。

**6、改进潮流能装置的叶片和转子。**该主题将投入 5500 万欧元，改进潮流能装置的叶片和转子以提高效率和可靠性。预计将部署少量大规模和 5 个中等规模试点项目，使技术从 TRL 4 级提升至 6 级以上。**具体行动**包括：通过结构试验验证叶片材料在预期寿命内的性能；更好地模拟湍流对叶片的影响；新材料的特性表征；改进叶片制造工艺；开发长效涂层或防污材料以降低运行和维护成本；技术开发人员与关键供应商合作开发叶片和转子的控制技术；真实海况下叶片和控制系统的示范。

**7、开发其他海洋能技术。**该主题将投入 2000 万欧元，海洋温差发电、海水空调、盐差能、潮差能等技术。预计将部署少量中等规模试点项目，使技术从中低级 TRL 提升至 6 级以上。**具体行动**包括：设计海洋温差能发电进水管和出水管，包括流体力学、海水适应性和材料设计，使用喷射器以提高涡轮机的压力比；海洋温差能发电替代工质开发，专用涡轮设计，改进换热器的热工水力设计，换热器材料开发；海洋温差能发电的环境友好型布局、生物污染问题和极端事件；开发用于盐差发电的可大规模生产的低成本膜；开发潮差能发电海岸泻湖低成本新设计；上述发电技术的环境监测、替代能源使用示范（制氢、海水淡化、制冷/供热）。

## **二、基座、连接与系泊装置**

**1、浮动式海洋能源装置的先进系泊和连接系统。**该主题将投入 5000 万欧元，开发、优化和测试浮动式海洋能系泊和连接解决方案。预计将部署 10 个中等规模试点项目，使技术从 TRL 3-4 级提升至 6 级。**具体行动**包括：用于浮动式波浪能和潮流能的电力传输系统的系泊和连接设计；通过应用其他行业的创新或开发适合海洋能源的新应用，降低布线成本；开发或应用系泊系统及其安装的先进模拟技术以减少设计中的不确定性和余量；推进组合式系泊和电气连接器或液压动力传输，以减少组件成本和连接数量；开发不需要大型船只和潜水队的新型系统，可安全快速地连接/断开；减少站点维护系统的维护要求；减少站点维护对发电设备性能要求的干扰；开发具有改善疲劳、阻尼、刚度、生物污染管理或其他降低成本特性的新材料。

**2、改进与示范海底固定式海洋能装置基座及连接系统。**该主题将投入 3500 万欧元，解决固定式基座的一系列工程挑战。预计将部署 5 个中等规模高 TRL 试点项目和 5 个小规模低 TRL 试点项目，使中等规模项目技术从 TRL 4 级提升至 6 级以上。**具体行动**包括：降低设备的电气连接成本，包括改进现有方法或开发新解决方

案，如开发低成本、高可靠性、低维护需求的连接器，也将考虑具有降低成本潜力的海上电力转换或其他方法；降低用于电缆或其他形式电力传输设备的辅助钢结构的成本或需求，包括降低制造、安装、维护等的总体成本；设计坚固且经过优化的潮流能装置基座，可在潮流能发电站点环境下经济高效地安装；改进波浪能和潮流能装置的安装，包括新颖的设计、流程和工具；设计、开发或验证基座和连接系统设计，以优化在波浪能或潮流能发电站点条件下的安装；通过改进基座或电力输送系统大幅降低成本。

### 三、海上物流及运行

**1、优化海上物流和运行。**该主题将投入 5500 万欧元，降低船舶物流、设备安装和运营成本。预计将部署少量大规模和 5 个中等规模试点项目，使技术从 TRL 4 级提升至 6 级以上。**具体行动**包括：从其他部门选择技术和方法并加以调整和实施；确定海洋能设备的特定需求，设计定制的方法和工具，包括重型硬件设施，以大幅降低成本；开发建模工具模拟海上运行以进行风险分析，包括复杂多体系统和意外事件（如与船舶相撞）；评估现有远程维护技术，并在适当情况下加以应用；更好地定义海洋能运行限制，如最大波高、风速和流速，包括应用新的传感器技术来监测环境条件或监测安装作业。

**2、用于状态监测和预测性维护的仪器。**该主题将投入 2500 万欧元，开发低成本传感器及与电信技术（物联网）结合降低运维成本。预计将部署少量大规模和 5 个中等规模试点项目，使技术从 TRL 4 级提升至 6 级以上。**具体行动**包括：将其他部门（尤其是海上风电）在状态和结构健康监测的最新进展应用于海洋能；将最新的传感器技术应用于现的海洋能部署；记录并分享传感器性能和可靠性方面的经验，以及使其适应恶劣海洋能环境的方法；改善从传感器收集的数据的传输或存储，如水下数据传输；制定通用准则以促进特定设备传感器和监控系统的跨应用转移；确定海洋能监测的新解决方案，并开发、测试和部署定制仪器；通过分析数据流、大数据方法和机器学习（包括人工智能）或利用现有运行数据进行数字化模型训练，改善基于状态的预测性维护。

### 四、能源系统集成

**1、开发和示范海洋能在利基市场中接近商业化的应用。**该主题将投入 1 亿欧元，通过项目部署以推进海洋能向利基市场的发展。预计将部署少量大规模和 10 个中等规模试点项目，使技术从 TRL 7 级提升至 8-9 级。**具体行动**包括：确定海洋能首次接近商业化部署的最佳应用，可能包括微电网和岛屿或是孤立的应用，如水产养殖或海水淡化，将为这些应用开发先进的定制解决方案；在利基市场进行部署和示范，选定的技术应在技术和制造上准备就绪，且具备成本竞争力。

**2、量化和示范海洋能对电网的益处。**该主题将投入 600 万欧元，示范海洋能为

电网带来的益处,以为政策和投资决策提供依据。预计将部署少量小规模试点项目,使技术从 TRL 7 级提升至 8-9 级。**具体行动**包括:在可预见的部署场景范围内,确定将波浪能或潮流能发电并入欧洲电网的技术问题和解决方案,包括成本效益分析,需考虑到电能质量、可预测性、间歇性、市场价格波动以及削减发电和供应不足的成本;量化由于减少了太阳能和风力发电导致的输电基础设施、需求响应和存储需求减少的益处;与公用事业公司和监管机构合作,纳入其对挑战、解决方案和效益的看法和评估。

## 五、数据收集、分析和建模工具

**1、海洋观测和建模,以优化海洋能设备的设计和运行。**该主题将投入 2500 万欧元,开发用于海洋能的创新气象和海洋观测、建模及预测方法。预计将部署少量中等规模和 5 个小规模试点项目,使该主题下技术从低 TRL 提升至接近市场准备的中高等级。**具体行动**包括:近场和实时波浪或潮流预测,对设备进行实时和预测控制,以提高输出,优化运行,并改善叶片、原动机或动力输出装置的负荷预测;估计设备引起的波浪和潮流变化对发电量的影响;观察、模拟和预测波浪/潮流的小范围变化,包括用于屈服预测或疲劳设计的平均状态研究,以及用于更安全和优化设计的极端状态(风暴)研究;开发更低成本、更易部署的波浪和潮流仪器,以及用于测量波浪和潮流的 X 波段雷达等新技术;改进已收集数据的通信或存储。

**2、开放式海洋能数据库。**该主题将投入 1000 万欧元开发海洋能开放式数据库,预计将部署 5 个小规模试点项目。**具体行动**包括:开发工具以促进海洋能项目产生数据的识别、访问和再利用;应用最新的自动化和数据采集、预处理、协议、存储和通信技术;协调现有的数据存储库和数据库,提供适当支持并创建新的存储库和数据库;根据各类用户的需求对数据进行分类,尽可能利用类似领域中常用的现有格式,如果需要,为海洋能数据收集、共享和使用开发定制模板。

## 六、交叉研究领域

**1、改善海洋能的环境和社会经济影响。**该主题将投入 1000 万欧元,推进海洋能环境和社会经济性影响研究,预计将部署 5 个小规模试点项目。**具体行动**包括:海洋能源生命周期影响分析,并与其他可再生能源进行比较;评估和监测海洋能项目的影响,包括海底扰动、冲刷、噪音、海流变化和波浪气候,以及它们对当地生物、沉积物运动和海岸地貌动态的影响;借鉴海上风电的有益经验以减少施工对环境的影响;评估海洋能发电阵列的海洋保护区效应,以及其对渔业和旅游业等生态系统服务的影响,并为决策提供可行的沿海地区综合管理信息;提高海洋保护区效应对生物多样性的有益做法的适用性;项目规划中优先考虑与当地环境组织和社区的协商和沟通,允许公开访问项目的环境观测数据;确定并改善当地社区对海洋能特有问题的认识和管理;应用海洋空间规划等现有工具及开发海洋能特定工具,以

更好地与其他活动和用户共享海洋空间；量化各种海洋能部署方案创造就业机会的潜力，尤其关注与决策相关的指标。

**2、标准化和认证。**该主题将投入 1000 万欧元，开发并完善海洋能适用准则、标准和程序，预计将部署 5 个小规模试点项目。**具体行动包括：**从子系统的实验室测试到最终系统验证中收集相关海洋环境的最佳实践；评估真实案例中的准则、规范和标准，并应用其他行业的经验；与国际机构合作制定国际公认标准；使投资者和公用事业公司、保险公司和监管机构参与标准的制定，以确保认证过程降低资本和保险成本。

（岳芳）

## DOE 资助 1.39 亿美元支持先进车辆技术研发

7 月 16 日，美国能源部（DOE）宣布资助 1.39 亿美元支持先进车辆技术项目研发<sup>7</sup>，重点围绕交通动力电池、车用轻量化材料、发动机燃油效率等领域开展，旨在提升汽车能效和电气化水平，节约能源成本支出，减少交通运输系统的温室气体排放。本次资助涵盖 16 个技术主题，具体内容如下：

### 1、基于硅负极锂电池研发

开发全氟化的局域高浓度电解质应用于硅负极锂电池，以提升电池的能量密度；针对硅负极，设计开发具备良好兼容性的高机械柔韧性的全固态电解质，抑制硅负极体积过度膨胀，延长硅负极的电池寿命；针对电动汽车，开发具备良好结构和电化学稳定性的富含硅成分的复合负极材料；研发更高性能的锂离子电池动力系统替代传统的内燃机；开发具备超低体积膨胀率的硅基纳米复合负极，以提升循环寿命。

### 2、无稀土元素的低成本电机开发

开发低成本、高性能的无稀土元素电机单元；基于新型永磁体、逆变器和先进热管理系统开发低成本的无稀土电驱动系统。

### 3、公共智能充电技术的开发和示范

开发并验证电动汽车智能充电管理系统、电网的智能化管理平台，实现充电设施和电网的良好协同，以减轻电动汽车对电网的负面影响，为消费者提供低成本、高效的电动汽车充电设施。

### 4、降低催化剂中铂族金属的使用量

围绕汽车尾气处理，开发低铂族金属含量的催化剂，或者开发高度分散的单原子铂族贵金属催化剂，以大幅降低催化剂成本。

### 5、提高中、重型丙烷发动机效率

<sup>7</sup> DOE Announces \$139 Million in Funding for 55 Projects to Advance Innovative Vehicle Technologies.  
<https://www.energy.gov/articles/doe-announces-139-million-funding-55-projects-advance-innovative-vehicle-technologies>

开发并优化中、重型直喷丙烷发动机、火花点火丙烷发动机燃烧效率，使其接近柴油发动机的燃烧效率。

#### **6、高性能农用越野车的研发和示范**

开发用于农用越野车的重型柴油发动机导管燃油喷射和喷雾冷却技术，以及针对农用越野车开发二冲程对置活塞发动机并进行示范，以提升车辆的性能。

#### **7、水平对置双缸发动机研发**

开发新一代水平对置双缸发动机，使发动机的整体高度降低、长度缩短、整车的重心降低，车辆行驶更加平稳，大大降低车辆在行驶中的振动，使发动机转速得到很大提升，减少噪音。

#### **8、车用的轻质高性能纤维增强聚合物复合材料开发**

针对智能汽车开发集成电子元件的复合材料智能结构；开发可定制的纤维增强复合材料，用于大容量电池外壳制备。

#### **9、优化交通运输系统**

发展拼车业务，提升交通运输系统能源效率；利用智能互联和自动化技术来优化货运交通管理系统，以提升货运效率；利用智能互联技术实现对车辆出行路线优化，减小堵车机会，提升车辆运行效率。

#### **10、车辆和基础设施互联**

利用先进的传感、大数据等技术来发展车到车、车到基础设施智能互联技术，实现交通信号灯和交通网络的智能优化，提升能源效率。

#### **11、城市交通智能化和低碳化**

利用机器学习技术发展智能交通移动系统提升城市交通能源效率；大规模普及电动汽车，推进城市交通系统低碳化发展。

#### **12、气体燃料技术研发示范**

开发并验证燃料电池电驱动系统；在混合动力长途汽车上进行天然气燃料发动机的现场示范验证。

#### **13、替代燃料研发**

在奥尔良地区开展电动飞机的示范；开发能够在低温下运行的电动汽车；开发电动重型货运卡车；开发采用丙烷燃料的货运卡车。

#### **14、电动汽车和充电设施**

在城市大规模推广普及电动汽车及其基础设施；发展城际电动交通网络生态系统。

#### **15、技术集成**

围绕电动汽车发展，开发在线电动汽车培训课程，为电动汽车产业培育劳动力；开发和演示一种用于电动客车的丙烷动力座舱加热系统；在美国农村推广和普及清



洁汽车燃料、电动汽车；替代燃料汽车维护与维修的综合成本估算。

## 16、交通和能源分析

电动汽车社区充电中心的计算机建模与技术-经济性模拟研究；分析区域内的重型电动卡车和基础设施需求；微观交通仿真软件开发，开展机会网络中城市轨道交通移动模型的研究。

(曾焱阳 郭楷模)

## DOE 资助 6500 万美元支持先进核能技术研发

6月18日，美国能源部（DOE）宣布资助 6500 万美元用于支持国家实验室、高校和企业联合开展核能基础研究、交叉技术开发和基础设施领域的创新核能技术研发项目<sup>8</sup>，资助将通过核能大学计划、核能使能技术计划和核科学用户设施计划为核能相关研究提供支持，具体内容如下：

### 1、核能大学计划

通过核能大学计划（NEUP）资助 5500 万美元用于 5 个主题领域研究工作：

**(1) 核燃料循环研究**，主要内容包括：使用高能 X 射线技术和拉曼光谱技术在高温下获取熔融盐的结构和动力学数据，以了解其与材料作用的物理和化学性质关系，以指导研发高性能的熔盐材料；开发一种表面络合模型，可以从理论角度解释铀的吸附和还原，从而通过工程屏障系统降低与富铁环境中铀迁移率相关的不确定性；通过研究成分-属性-结构之间的关系，开发和优化高耐用度且易于处理的磷酸盐基玻璃材料；建立一个核反应热力学自洽数据库，系统描述放射性同位素在矿物/水界面的吸附作用机制，以指导核废料处置技术的研究开发；研究高温高离子强度下核反应堆辐射屏蔽材料的辐射蠕变规律；结合材料行为模型，开发一种整合线性和非线性超声波的表征技术来表征耐事故燃料包壳涂层材料的物理活性性质；用超声波喷雾法制备干式核燃料和核废料贮存罐用的柔性硬质陶瓷涂层材料；基于高通量计算平台开发预测模型用于研究含氟熔融盐的热化学和热物理性质；研究氮化铀燃料与液态铅、铝形成奥氏体合金的化学相互作用和相容性；熔融盐中相平衡和裂变产物溶解度的混合热力学第一性原理计算研究；开发氧化镓肖特基二极管探测器用于测量熔融盐锕系元素浓度；用于提高存储库性能的无机微纤维增强工程屏蔽材料的多尺度和多物理场建模；开发多功能激光加工维修技术来减轻焊接不锈钢的点蚀和应力腐蚀开裂；开发和评估各种各样的表面喷丸处理方法，以及混合表面处理方法，以减轻用于核燃料干法存储的不锈钢罐中氯引起的应力腐蚀开裂；开发用于乏燃料存储罐的新型 SiOCN (H) 涂层。

<sup>8</sup> Department of Energy Invests \$65 Million at National Laboratories and American Universities to Advance Nuclear Technology.

<https://www.energy.gov/articles/department-energy-invests-65-million-national-laboratories-and-american-universities>

**(2) 核能基础研究**，主要内容包括：利用 Modelica 公司开发的新型热能储存 (TES) 模型模拟研究多效蒸发器和联合循环燃气轮机系统的模型，研究利用核热能从盐水中生产应用水方法；对现有的反应堆试验和运行数据进行计算机仿真分析，同时对反应堆运行的瞬态温度进行监测，以评估反应堆反应速率的潜在影响因素；对由中子驱动的先进核能反应堆（如气冷堆、熔盐堆等）的热能散射数据进行采集和评估。

**(3) 先进核能建模与仿真**，为核电厂网络风险评估设计开发一个灵活的仿真环境，以支持网络防护架构的设计；球床反应堆堆芯围筒旁流实验和数值模拟研究；球床反应堆流动与传热的计算流体动力学分析；将 Modelica 公司开发的新型热能储存 (TES) 模型与正在进行的核能-可再生能源混合能源系统 (NRHES) 建模工作相结合，以对比新混合能源系统与单纯的核能基荷电力优劣势。

**(4) 反应堆概念原型的研发和示范**，主要内容包括：高温气冷堆进气事故中自然循环建立时间及影响因素分析；制定适合于人口稠密地区部署的微型反应堆的选址标准；针对小型模块化反应堆设计并建造一个紧凑型的蒸汽发生器 (CSG) 以提高反应堆经济性；不锈钢在模拟压水堆一回路异常水化学条件下的应力腐蚀敏感性研究；用于含氯熔盐快堆的新型镍基合金研发；评估微型堆在分布式发电应用中的机遇和挑战；轻水堆一次冷却剂水化学性质对不锈钢的腐蚀影响研究；针对小型模块化反应堆开发新型的增强自动化控制方法，提升运营效率、降低成本；开发一种基于人工智能的故障检测工具，以减少核电厂中人为因素的错误几率，改善运行和维护，降低核电厂成本。为三结构各向同性 (TRISO) 颗粒燃料缓冲层开发一个辐照行为预测模型。

**(5) 研究型反应堆设施建造和改善**，主要内容包括：推进核材料和堆芯传感器的研究；吸引和培养下一代具有核能背景的高素质劳动力；对核材料进行快速、准确的热力学和动力学研究；研究在真实负荷条件下高温气冷堆材料的实时微观结构演变；建立一个新的原位、纳米尺度的结构、成分和缺陷演变检测系统，以原位表征不同应力下辐照材料微观结构变化；对爱达荷州立大学的 Aerojet General Nucleonics 201 型反应堆进行改进，减少失效概率，提高反应堆的整体可靠性和安全性；对麻省理工学院研究反应堆现有的应急电力电池系统进行更新；对普渡大学 1 号反应堆的换热器和相关水处理系统进行更新升级，以确保反应堆的安全、可靠连续运行；犹他大学 TRIGA 反应堆的冷却系统替换，以提高反应堆性能和效用，满足反应堆在满功率下运行更长时间，提高安全性和运行可靠性。

## 2、核能使能技术计划

通过核能使能技术 (NEET) 计划资助近 500 万美元用于国家实验室和大学联合开展的 5 个交叉研究项目，主要研究内容包括：开发和演示一种新型脉冲热断层成

像技术，用于无损检测 3D 打印制造的核反应堆部件材料；开展一套用于传感器分配和校准的数据分析方法，以解决如何在核设施中分配传感器组的问题；整合先进的传感器和数据科学的分析技术，推动核电站的在线监测和预测性维护，并提升核电厂的性能；利用两座大学研究堆构建和测试基于光纤的伽马温度计（OFBGT），并开发相应的方法来处理由 OFBGT 产生的数据；集成可溶性载体、拓扑优化和微结构设计等方法，以大幅降低激光粉末 3D 打印制造的核电站关键组件的生产和后处理成本。

### 3、核科学用户设施计划

通过核科学用户设施计划（NSUF）资助 660 万美元用于 2 个国家实验室、3 个大学和 1 个企业主导的项目，主要研究内容包括：制造非侵入式和空间分辨的传感器；动力学和微结构硬化建模、多功能光纤传感器和增材制造学科的融合基础、试验中子和离子辐射测试、核设施材料辐照后检测、同步辐射高性能新型强光源设计开发，以及通过 NSUF 设计和分析实验的技术援助。

（曾焱阳 郭楷模）

## 基于半导体制造新工艺制备大面积柔性单晶钙钛矿薄膜

目前文献报道的钙钛矿太阳能电池器件大部分都是基于多晶钙钛矿薄膜，因为多晶结构制备工艺较为简单，但多晶薄膜存在大量缺陷且结构稳定性较差。相比之下，单晶钙钛矿薄膜无晶界缺陷极少，因此具备更加优异的电荷传输性能和稳定性，但该类薄膜的制备工艺极具挑战性（薄膜成核、形貌和组分难以控制），因此在制备工艺上实现突破是单晶钙钛矿电池实现商业化应用的关键因素。

由加州大学圣地亚哥分校 Sheng Xu 教授课题组牵头的国际联合研究团队基于商业化的半导体平板印刷工艺开发出新的制备方法，成功在柔性衬底上制备出了厚度精确可控的大面积（ $0.25\text{ cm}^2$ ）柔性单晶钙钛矿薄膜，相应电池器件获得了 19% 的高效率，且具备了优异的机械柔韧性和长程稳定性，表现出了良好的商业化应用潜力。研究人员基于商业化的平板印刷半导体工艺开发出全新的钙钛矿薄膜制备工艺，即溶液过程的平板印刷辅助外延生长和转移法，利用该新工艺在柔性衬底上制备了钙钛矿薄膜。扫描电镜表征显示，制备的薄膜没有出现晶界，而 X 射线衍射测试发现薄膜结晶性质量极高，是单一相结构，也即制备的钙钛矿薄膜为单晶结构。进一步的实验发现钙钛矿前驱体组分显著影响薄膜的厚度，通过组分的调谐（即调控铅元素和锡元素的比例， $\text{MAPb}_{0.5+x}\text{Sn}_{0.5-x}\text{I}_3$ ）实现了 600 nm 到 5  $\mu\text{m}$  厚度之间的薄膜厚度精确调控制备。时间相关的光致发光谱表征结果显示，当厚度不超过 2  $\mu\text{m}$  时，载流子收集效率和寿命随着厚度增加而改善；而当厚度超过 2  $\mu\text{m}$  时，载流子的寿命则出现下降。外量子效率测试结果呈现与上述一样的随厚度增加而先增后减的变化

趋势。随后研究人员制备了无 Sn 掺杂的钙钛矿薄膜  $\text{MAPbI}_3$  和连续 Sn 梯度掺杂（即形成一种梯度变化的带隙有助于增强光吸收利用率和载流子的传输收集）的薄膜  $\text{MAPb}_{0.5+x}\text{Sn}_{0.5-x}\text{I}_3$ ，并组装成完整的光伏器件开展电化学性能测试。在一个模拟的标准太阳光辐照下，基于无 Sn 掺杂的钙钛矿薄膜电池器件（面积为  $0.25\text{ cm}^2$ ）的平均光电转换效率约为 16%，而采用连续 Sn 梯度掺杂  $\text{MAPb}_{0.5+x}\text{Sn}_{0.5-x}\text{I}_3$  薄膜器件电池（面积尺寸同上）效率显著增强，平均光电转换效率达到约 19%，而性能最佳器件

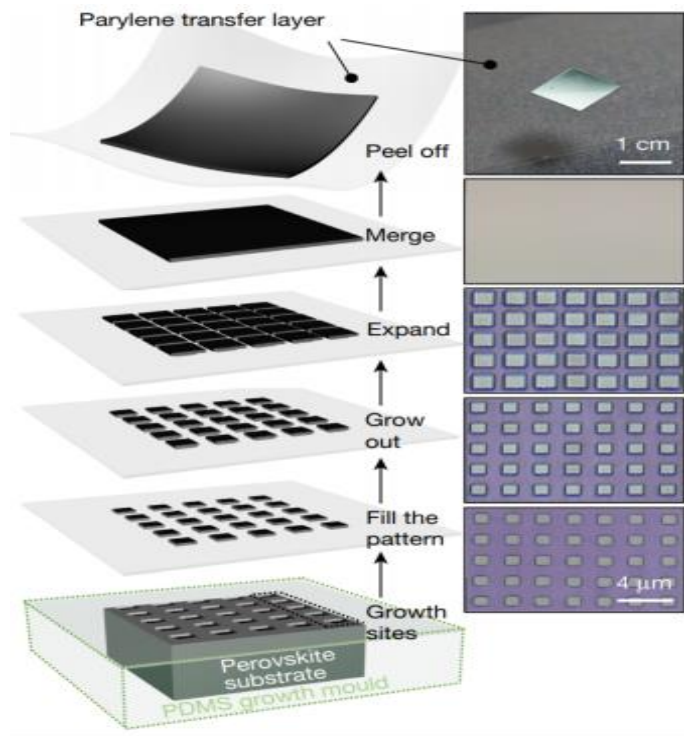


图 1 基于新工艺的单晶柔性钙钛矿薄膜制备流程

更是突破 20%，达到 20.04%。研究人员进一步测试了器件的机械柔韧性，对电池器件进行连续 300 余次的弯折后再测试其光电性能，结果显示  $\text{MAPbI}_3$  薄膜器件出现了显著性能衰退，而连续 Sn 梯度掺杂  $\text{MAPb}_{0.5+x}\text{Sn}_{0.5-x}\text{I}_3$  薄膜电池性能基本没有衰退，表现出优异的机械柔韧性。长程稳定性测试结果呈现出与机械性能类似情况，连续 Sn 梯度掺杂  $\text{MAPb}_{0.5+x}\text{Sn}_{0.5-x}\text{I}_3$  薄膜电池在放置近 11 个月后，效率仍可维持 90% 初始效率，而  $\text{MAPbI}_3$  薄膜器件性能基本消退殆尽。

该项研究基于商业化的半导体平板印刷工艺开发出全新的钙钛矿薄膜制备工艺，成功实现了在柔性衬底上制备出高结晶质量的单晶钙钛矿，消除了多晶晶界和缺陷，使得钙钛矿薄膜光吸收和载流子的传输收集性能显著提升，进而提升了电池器件性能和稳定性，且具备优异的机械柔韧性表现出更加广阔的应用前景；再则新制备工艺具备了商业化生产线工艺特性，容易快速转化形成实际生产能力；将钙钛矿太阳能电池的商业化应用向前推进了一大步。相关研究成果发表在《Nature》<sup>9</sup>。

（郭楷模）

<sup>9</sup> Yusheng Lei, Yimu Chen, Ruiqi Zhang, et al. A fabrication process for flexible single-crystal perovskite devices. *Nature*, 2020, 583, 790–795.

# 低碳化多能融合

## 欧盟发布能源系统集成战略打造绿色智慧综合能源系统

7月8日，欧盟委员会发布《能源系统集成战略》<sup>10</sup>，作为“欧盟复苏计划”的一部分，提出了促进欧洲能源系统集成以到2050年实现气候中性欧洲的战略规划。欧盟指出，能源系统集成将为欧洲向绿色能源转型提供框架，能源系统应作为一个整体进行规划和运行，将不同能源载体、基础设施和消费部门联系起来，这将基于三大支柱，即：以能效为核心的“循环”能源系统；扩大终端用能部门的电气化；在难以电气化的部门推广使用清洁燃料。为此，该战略提出了38项行动，涵盖修订立法、财政支持、新技术和数字化工具的研究和部署、指导成员国的财政措施和逐步取消化石燃料补贴、市场治理改革和基础设施规划、改进消费者的信息获取等方面。关键要点如下：

### 一、能源系统集成概念

能源系统集成是指通过在多个能源载体、基础设施和消费部门之间建立更紧密的联系，以提供低碳、可靠和资源节约的能源服务为目标，对能源系统进行“整体”规划和运营，并使社会付出最低成本。主要包含三个相辅相成的概念：

**(1) 以能效为核心的“循环”能源系统。**以能效为核心，优先考虑能源强度最低的选择，将废物流重新用于能源用途，并在各个部门之间发挥协同作用。

**(2) 扩大终端用能部门的直接电气化。**可再生能源发电的快速增长及其成本竞争力可以满足日益增长的能源需求，例如在供暖或低温工业过程中使用热泵，在交通运输中使用电动汽车，或在某些行业使用电炉。

**(3) 在直接加热或电气化不可行、效率不高或成本较高的终端应用中使用可再生和低碳燃料（包括氢）。**由生物质生产的可再生气体和液体燃料或可再生和低碳氢可以提供解决方案，利用电力、天然气和最终应用部门之间的协同作用来存储波动性可再生能源。例如，在工业过程和重型卡车和铁路运输中使用可再生氢，在航空和海上运输中使用可再生电力生产的合成燃料，或在附加值最大的部门使用生物质。

能源系统集成战略提出了如何加快向更综合的能源系统转型的愿景，该系统以各行业成本最低的方式支持气候中性经济，同时加强能源安全，保护健康和环境，促进增长、创新和全球工业领导地位。将此愿景变为现实需要现在就采取果断的行动，能源基础设施投资的经济寿命一般为20至60年，未来5-10年采取的措施对于建立一个综合能源系统以推动欧洲到2050年实现气候中性至关重要。因此，该战略

<sup>10</sup> Powering a climate-neutral economy: An EU Strategy for Energy System Integration.  
[https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/energy\\_system\\_integration\\_strategy\\_.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/energy_system_integration_strategy_.pdf)

在考虑各成员国不同起点的前提下，提出了具体政策和立法措施，以逐步形成新的综合能源系统。

## 二、通过能源系统集成促进清洁能源转型的 38 项行动

### 1、以“能效优先”为核心的循环能源系统

**(1) 更好地应用“能效优先”原则。**将采取如下行动：①在实施欧盟和国家法规时（2021 年），向成员国发布如何使“能效优先”原则在整个能源系统中应用的指导；②在所有即将实行的相关方法（如欧洲资源充足性评估）和立法修订（如《欧洲跨境能源基础设施法规》<TEN-E>）中进一步倡导“能效优先”原则；③在 2021 年 6 月的《能效指令》评估中评估一次能源因子<sup>11</sup>，以充分认识到通过可再生能源发电和供热实现的节能效果。

**(2) 构建循环能源系统。**将采取如下行动：①在 2021 年 6 月对《可再生能源指令》和《能效指令》的修订中，通过加强对区域供热网络连接、能源绩效核算和合同框架的要求，促进工业场所和数据中心的废热再利用；②通过新的《共同农业政策》、结构基金（Structural Fund）和“环境与气候行动”（LIFE）计划（自 2021 年起），鼓励利用农业、粮食和林业部门的生物废物和残留物，并支持农村循环能源社区建设。

### 2、基于以可再生能源为主导的电力系统，加速终端用能电气化

**(1) 确保可再生能源电力供应的持续增长。**将采取如下行动：①通过《海上可再生能源战略》以及后续的监管和融资措施，确保海上可再生能源电力的经济高效规划和部署，考虑在现场或附近制氢的潜力，并加强欧盟在海上技术领域的工业领导地位（2020 年）；②在 2021 年 6 月对《可再生能源指令》的修订中，探索建立与可再生能源电力相关的“最低强制性绿色公共采购”（GPP）标准和目标，并通过 LIFE 计划进行能力建设融资；③评估《可再生能源指令》（2021 年 6 月），解决高比例可再生能源电力供应的剩余障碍，使之符合终端用能部门的需求增长。

**(2) 进一步加快能源消费电气化进程。**将采取如下行动：①作为“革新浪潮”（Renovation Wave）计划的一部分，利用欧盟所有可用资助，包括“凝聚基金”（Cohesion Fund）和“投资欧洲”（InvestEU），进一步推动建筑供热电气化（特别是通过热泵），部署建筑物可再生能源，并推出电动汽车充电点（2020 年起）；②制定在交通运输、建筑和工业供热和制冷等领域使用可再生能源电力的更具体措施，尤其将通过修订《可再生能源指令》以及制定部门目标加以实现（2021 年 6 月）；③通过“地平线欧洲”和“创新基金”资助工业部门低温过程热电气化试点项目（2021 年）；④在修订《工业排放指令》时，评估支持工业过程进一步脱碳的方案，包括通过电气化和能效（2021 年）；⑤建议修订汽车和货车的碳排放标准，以明确从 2025

<sup>11</sup> 一次能源因子（Primary Energy Factor）指为产生单位终端能源（电或热）而消耗的一次能源数量。

年起向零排放交通转型的路径（2021年6月）。

**（3）加快推出电动汽车基础设施，确保新负荷的集成。**将采取如下行动：①在2025年之前，利用欧盟现有资助工具（包括“凝聚基金”、“投资欧洲”和“连接欧洲设施”<Connecting Europe Facility>）支持建设100万个充电站，并定期就资助机会和监管环境进行沟通，以推出充电基础设施网络（从2020年起）；②通过将来的修订版《替代燃料基础设施指令》，加速推广替代燃料基础设施（包括电动汽车），加强互操作性要求，确保充足的客户信息，充电基础设施的交叉可用性，以及电动汽车的有效整合电力系统中的车辆（到2021年）；③修订《泛欧运输网络（TEN-T）法规》（2021年前），对充电和加氢基础设施提出相应要求，并通过修订TEN-E法规探索更大的协同效应，以对跨境大容量充电及加氢基础设施提供能源网络相关支持（2020年）；④开发用于需求灵活性的网络代码，以释放电动汽车、热泵和其他电力消费促进能源系统灵活性的潜力（2021年底开始）。

### **3、在难以脱碳部门推广可再生和低碳燃料（包括氢能）**

将采取如下行动：①在《可再生能源指令》等现有法规基础上，基于全生命周期温室气体减排和可持续性标准，为所有可再生和低碳燃料提出一套全面的术语体系，并为此类燃料建立一个欧洲认证体系；②考虑通过修订《可再生能源指令》在特定的终端部门（包括航空和海事）中设立最低份额或配额（2021年6月），并通过“航空燃料和海运燃料”倡议（REFUEL Aviation and FUEL Maritime）酌情加以补充（2020年）；③通过“地平线欧洲”、“投资欧洲”和LIFE计划以及欧洲地区发展基金，促进对生产和消费可再生和低碳燃料的综合碳中和产业集群旗舰项目的融资（2021年起）；④通过“地平线欧洲”计划刺激可再生氢生产化肥（2021年起）；⑤通过“创新基金”，示范并扩大碳捕集用于合成燃料的生产（2021年起）；⑥在健全和透明的碳核算基础上，建立脱碳认证监管框架，以监测和核实脱碳的真实性（到2023年）。

### **4、构建适合脱碳和分布式能源的能源市场**

**（1）促进所有能源载体的公平竞争环境。**将采取如下行动：①向成员国发布指导意见，解决电力的高征税项和征费问题，确保各能源载体价格中非能源成分占比的一致性（到2021年）；②通过修订《能源税收指令》，使能源产品和电力的税收与欧盟的环境和气候政策保持一致，并避免对用于储能和氢气生产的电力被双重征税；③在能源部门和成员国之间提供更加一致的碳价信号，包括通过一项可能的提案将排放交易机制扩展到新的部门（到2021年6月）；④逐步取消直接化石燃料补贴，包括通过审查国家援助框架和修订《能源税收指令》（从2021年起）；⑤确保在公共支持的情况下修订国家援助框架以支持经济高效的脱碳（到2021年）。

**（2）调整天然气监管框架。**将采取如下行动：①审查立法框架，以设计一个适

合可再生气体的竞争性脱碳天然气市场,包括增强天然气客户的信息和权利(到2021年)。

**(3) 改进用户的信息获取。**将采取如下行动:①在《气候公约》的背景下,发起一项有关能源客户权利的消费者信息运动(到2021年);②改进向用户提供工业产品(尤其是钢铁、水泥和化学品)的可持续性信息,将其作为可持续产品政策倡议的一部分,并酌情通过补充立法提案(到2022年)。

### **5、更为集成的能源基础设施**

将采取如下行动:①确保 TEN-E 法规(2020年)及其修订版(2021年)完全支持一个更加综合的能源系统,包括加强能源和交通基础设施之间的协同作用,以及实现2030年电力互联互通15%的目标;②审查十年网络发展计划(TYNDP),确保与欧盟的脱碳目标和跨部门基础设施规划完全一致;③通过修订《可再生能源指令》和《能源效率指令》提出更严格的义务(2021年6月)以及为旗舰项目融资,加快对智能、高效、基于可再生能源的区域供热和制冷网络的投资。

### **6、数字化能源系统及支持创新框架**

将采取如下行动:①实施数字化能源行动计划,为数字能源服务开发一个竞争性市场,确保数据隐私和主权,并支持对数字能源基础设施的投资(2021年);②制定电力网络安全的网络法规,其中包含特定行业的规则,以增强跨境电力流、规划、监控、报告和风险管理的弹性和网络安全(到2021年底);③通过在欧盟范围内访问数据的互操作性要求和透明程序的实施法案(2021年);④发布新的清洁能源研究和创新展望,以确保研究和创新支持能源系统集成(到2020年底)。

(岳芳)

## **欧盟委员会发布欧洲氢能战略提出三步走路线**

7月8日,欧盟委员会发布了《欧洲氢能战略》<sup>12</sup>,为欧洲未来30年清洁能源特别是氢能的发展指明了方向。该战略通过降低可再生能源成本并加速发展相关技术,扩大利用可再生能源制氢在所有难以去碳化的领域大规模应用,最终实现2050年气候中性经济体的目标。报告要点如下:

### **一、欧洲氢能生态系统的2050年战略路线**

欧洲氢能发展轨迹将是渐进式的,清洁氢能经济的发展预计将分为3个阶段。具体路线目标如下:

**第一阶段(2020-2024年)**,氢能发展的目标是降低现有制氢过程的碳排放并扩大氢能应用领域,将其从现有的化学工业领域扩展到其他领域。此阶段的战略计划是在2024年前安装至少6吉瓦可再生能源电解槽,可再生能源制氢年产量达到100

<sup>12</sup> EU Hydrogen Strategy. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_20\\_1259](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_1259)



万吨。目前欧盟完成安装的可再生能源电解槽仅为 1 吉瓦。

**第二阶段（2024-2030 年）**，使氢能成为综合能源系统的重要组成部分。其战略计划是安装至少 40 吉瓦可再生能源电解槽，可再生能源制氢年产量达到 1000 万吨。氢能的应用领域将逐渐扩展到诸如钢铁冶炼、卡车、轨道交通以及海上运输等新领域。在这一阶段氢能仍将在靠近应用端或者可再生能源资源丰富的地区生产，此阶段只能实现区域生态能源系统。

**第三阶段（2030-2050 年）**，可再生能源制氢技术将逐渐成熟，其大规模部署将使所有脱碳难度系数高的工业领域使用氢能代替。

## 二、增加投资预算、建立投资支持机制实现欧盟氢能产业快速发展

氢能战略概述了全面的投资计划，包括对制氢、储氢、运氢全产业链，以及现有天然气基础设施、碳捕集和封存技术等投资。预计总投资超过 4500 亿欧元。

为支持投资并促进构建氢能生态系统，欧盟将实施以下几项措施：①7 月 8 日在欧盟委员会在新工业战略中宣布成立欧洲清洁氢能联盟，通过圆桌会谈和政策制定者平台扩大氢能生产的投资渠道；②继续促进欧盟成员国协调一致的投资，以支持氢能供应链建立；③通过激励私人投资以支持氢能部署；④欧盟许多国家都明确将可再生低碳氢能作为国家能源和气候战略计划中的组成部分；⑤欧洲区域发展基金和凝聚基金将继续支持绿色转型，为碳密集型地区提供可能性方案；⑥促进能源与交通设施协同发展，为氢能专用基础设施、天然气管网再利用、碳捕集项目以及加氢站建设提供资金支持；⑦提供约 100 亿欧元的创新基金在未来十年间支持低碳氢能的创新技术示范；⑧欧盟将为相关国家和地区的氢能项目提供针对性的支持。

## 三、欧洲氢能战略的关键行动

### 1、通过制定政策框架促进氢能生产规模扩大

目前欧洲电解槽制氢总产能低于 1 吉瓦/年，为在 2030 年前实现 40 吉瓦电解槽容量的战略目标，欧盟将与欧洲清洁氢能联盟、成员国和领先地区协调努力，制定相应的支持计划，包括：（1）根据氢能碳减排收益制定支持性政策框架，根据影响评估采用合适的政策工具，包括根据氢气全生命周期排放量制定通用的制氢装置低碳限值或标准，可参考现有的排放交易体系（ETS）对氢生产的基准（2021 年 6 月）。

（2）为可再生氢和低碳氢的认证引入一套全面的术语体系和全欧洲统一标准，可建立在现有的 ETS 监测、报告和验证以及《可再生能源指令》的相关规定基础上（2021 年 6 月）。（3）为进一步鼓励低碳氢和可再生氢的生产，欧盟将修订 ETS 标准。（4）欧盟将在 2021 年提出碳边境调节机制，以降低碳排放风险。（5）将为碳交易差价合约（CCfD）建立招标系统，将针对炼油厂和化肥生产、炼钢以及基本化学品生产行业的氢能生产、在海运中部署氢气及衍生燃料以及在航空部门使用氢基合成燃料进行试点。（6）通过竞争性招标对可再生氢建立直接、透明、基于市场的支持计划。

## 2、为氢能基础设施和市场规则设计框架

有连接供需的基础设施，是欧盟广泛使用氢作为能源载体的一个必要条件。氢能基础设施的布局最终取决于氢气生产方式、需求和运输成本，预计在 2024 年之后会显著增加。具体布局计划包括：（1）通过工业集群和沿海地区的现场生产（从当地可再生能源或天然气制氢），实现生产和需求之间的“点对点”连接。（2）将建立本地氢气网络，优化氢气生产、使用和运输（包括远距离运输）。将改进跨欧能源网络和为竞争脱碳气体市场评估市场法规，确保整个能源系统效率。（3）2030 年后，随着低热值天然气逐步淘汰，现有泛欧天然气基础设施的组成部分可以重新利用，为大规模跨境运输氢气提供必要的基础设施。（4）启动氢能基础设施规划，包括在改进的跨欧能源和交通网络以及十年网络开发计划（2021 年）中考虑加氢站网络规划。（5）更新气体质量标准以确保氢气掺混于天然气网工程在不同成员国之间的顺利连通。（6）修订《替代燃料基础设施指令》和《跨欧洲交通网络条例》（2021 年），以加快不同燃料基础设施部署。（7）设计支持氢能部署的市场规则，消除高效开发氢能基础设施过程中的障碍。实施立法审查，如审查立法无碳化天然气市场竞争（2021 年）。

## 3、进一步加强研发和技术创新

欧盟多年来一直支持氢能研究和创新，尤其是在电解槽、氢燃料补给站和兆瓦级燃料电池方面。为确保整个氢供应链服务于欧洲经济，需进一步加强研发和技术创新。具体制定的相关政策包括：（1）进一步研究以支持交叉领域的政策制定，特别是改进和协调（安全）标准，以及监测和评估社会和劳动力市场的影响。开发可靠方法评估氢能技术及其相关价值链的环境影响。根据未来部署全面评估氢能相关关键原材料需求，考虑供应安全性和可持续性。（2）建立清洁氢能伙伴关系，重点关注可再生氢的生产、存储、运输、分配和关键应用（2021 年）。（3）按照现有政策，指导支持氢价值链的重点项目开发。（4）通过创新基金促进氢能创新技术示范（2020 年）。（5）在凝聚基金投资下开展碳密集地区的氢技术区域间创新试点行动（2020 年）。

## 4、促进氢能国际合作

清洁氢为重新设计欧洲与邻国和地区及其国际、区域和双边伙伴的能源伙伴关系、促进供应多样化和帮助设计稳定和安全的供应链提供了新的机遇。加强氢能国际合作，欧盟可开展以下工作：（1）促进与南部和东部邻国合作伙伴以及能源共同体国家（特别是乌克兰）在可再生能源发电和制氢方面的合作。（2）在创新使命（MI）的下阶段任务中发展氢能。（3）在“非洲-欧洲绿色能源倡议”框架内与非洲联盟制定可再生氢合作流程。（4）在多边论坛上促进国际标准的制定，加强欧盟在国际论坛上有关氢的技术标准、法规和定义的领导地位。（5）通过国际标准化机构和联合国全球技术法规（联合国欧洲经委会、国际海事组织）扩大国际合作，包括协调统

一氢动力汽车的法规。(6) 开展二十国集团框架下的合作, 以及与国际能源署和  
国际可再生能源机构的合作, 为交流经验和最佳做法创造更多机会。(7) 为欧元计价  
交易制定基准, 从而有助于巩固欧元在可持续能源贸易中的作用(2021年)。

(汤匀 岳芳)

## DOE 资助 6400 万推进氢能规模化应用技术研发

7月20日, 美国能源部(DOE)宣布2020财年将在“H<sub>2</sub>@Scale”计划框架下资  
助6400万美元推进氢能技术研发示范<sup>13</sup>, 旨在推进氢能和燃料电池技术突破和应用,  
项目主要涉及储氢、燃料电池、电解槽, 以及促进港口、数据中心、炼钢厂等工业  
领域开展氢能利用示范, 实现经济、安全可靠的大规模氢气生产、运输、存储和利  
用。本次资助项目详情如下:

### 1、电解槽研发(资助金额: 1390 万美元)

该领域开展如下研究: (1) 吉瓦规模的质子交换膜电解槽先进制造工艺研发;  
(2) 通过优化电解槽组件(电极、隔膜和催化剂)和制造工艺, 降低质子交换膜电  
解槽的成本。

### 2、用于氢气和天然气储罐的先进碳纤维材料研发(资助金额: 1040 万美元)

该领域开展如下研究: (1) 开发由低成本聚丙烯腈纤维的熔融纺丝组成的碳纤  
维材料, 用于制备高压储氢罐; (2) 开发低成本、高机械强度的中空碳纤维材料用  
于高压天然气储罐; (3) 开发低成本复合碳纤维材料, 降低储罐成本。

### 3、重型卡车用的燃料电池研发(资助金额: 1570 万美元)

该领域开展如下研究: (1) 通过增强离聚物骨架的稳定性延长全氟磺酸(PFSA)  
质子交换膜使用寿命; (2) 抗氧化剂聚合物用于燃料电池的聚合物电解质膜以延长  
隔膜寿命; (3) 研发先进的质子交换膜燃料电池膜电极用于重型卡车燃料电池系统;  
(4) 开发能够在120°C以上温度高效稳定使用的长寿命、高导电性的质子交换膜;  
(5) 开发用于重型卡车的质子交换膜燃料电池系统; (6) 在美国本土开设重型卡  
车用的燃料电池制造工厂。

### 4、新市场开发(资助金额: 800 万美元)

该领域开展如下研究: (1) 将氢发电厂的电力用于炼钢厂; (2) 将固体氧化物  
电解池(SOEC)与直接还原炼铁工厂集成, 实现绿色炼铁。

### 5、市场示范(资助金额: 1400 万美元)

该领域开展如下研究: (1) 开展海洋氢能产业示范(如探索氢能动力船舶、氢  
能在港口机械设备中的多应用场景示范); (2) 开展氢能电力供应数据中心项目示

<sup>13</sup> Energy Department Announces Approximately \$64M in Funding for 18 Projects to Advance H<sub>2</sub>@Scale  
<https://www.energy.gov/articles/energy-department-announces-approximately-64m-funding-18-projects-advance-h2scale>

范。

## 6、为氢能产业培养劳动力（资助金额：200 万美元）

该领域开展如下研究：（1）针对未来的氢能产业，开展氢能和燃料电池技术知识以及劳动力发展和培训计划。

（汤匀 郭楷模）

## 新型异质结质子传导材料将燃料电池质子迁移率提升百倍

质子陶瓷燃料电池理论发电效率高达 75%，且能够在较低的温度（350-600°C）高效运行，还拥有更优异的抗积碳和抗硫中毒特性，是极具发展前景的新一代燃料电池技术。然而由于常规的电解质质子传输效率较低，限制了质子陶瓷燃料电池性能，因此亟需开发高性能的质子传输材料。

由中国地质大学 H. B. Song 教授课题组牵头的国际联合研究团队设计构造半导体异质结的电解质材料，得益于半导体异质结界面电场诱导金属态，构造出了具有低迁移势垒的质子超高速

传输通道，相比传统的电解质其质子传输效率大幅提升了 3 个数量级，进而显著提升了电池器件性能，展现出了工业化应用潜力。相关研究表明，在传统质子传导材料里，质子需要克服巨大的能垒，通过氧空位跳跃前行，这使得众多的电解质材料的质子传输效率较低限制了质子陶瓷燃料电池性能。为此，研究人员采用了不同

于传统离子导体（也即电解质）掺杂改性的方法，而是构建半导体材料的异质结构，即由 P 型半导体钴钠复合氧化物（ $\text{Na}_x\text{CoO}_2$ ，NCO）和 N 型半导体氧化铈（ $\text{CeO}_2$ ）构成的异质结 NCO/ $\text{CeO}_2$ ，旨在通过利用半导体异质界面电子态/金属态特性把质子局域于异质界面，设计和构造具有低迁移势垒的质子超高速传输通道。为了证实上述方法的可行性，研究人员首先通过第一性原理进行了理论模拟研究发现，相比单一的 NCO 或  $\text{CeO}_2$  离子导体材料，NCO/ $\text{CeO}_2$  异质结的质子结合能显著降低，也即质子传输的能垒降低，这有助于了加速质子的传输。质子导电率测试显示，NCO/

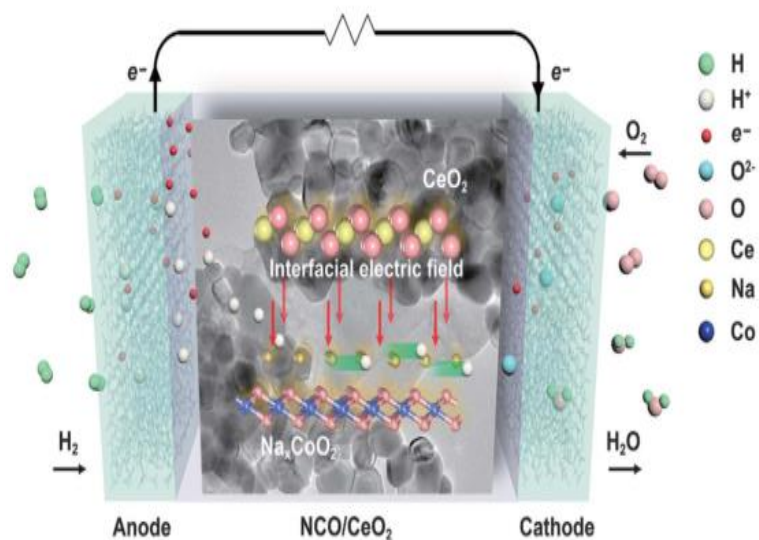


图 1 基于异质结 NCO/ $\text{CeO}_2$  质子传导材料的燃料电池结构示意图

CeO<sub>2</sub> 异质结的质子迁移率达到了 0.2-0.3 S/cm，相比传统掺杂的离子导体（质子迁移率一般为 0.001 S/cm）提升了近 3 个数量级。随后研究人员利用上述的异质结离子导体材料组装成质子陶瓷燃料电池并进行电化学测试，实验结果显示在 520℃ 工作温度下，电池开路电压为 1.07 V，输出功率密度 1000 mW/cm<sup>2</sup>，高于了目前报道的性能最优的掺杂改性离子导体材料器件（钇稳定二氧化锆<YSZ>，输出功率密度为 890 mW/cm<sup>2</sup>）；且可以在 100 mA/cm<sup>2</sup> 电流密度下连续稳定性运行 100 余小时。通过微观表征显示电池性能增强主要是归因于异质结界面局域电场，即在燃料电池中质子经电化学反应嵌入到异质材料界面，被带正电的 CeO<sub>2</sub> 表面排斥到 NCO 表面，但同时受到带正电 Na<sup>+</sup> 的排挤不能进入 NCO 内部，因而局域于两者材料的界面空间，从而实现在低势垒的层间连续快速迁移。

该项研究设计开发了全新的异质结质子导体材料，受益于异质界面的局域电场诱导的质子快速传输通道，其质子传导效率相比传统的掺杂改性工艺提升了 3 个数量级，从而显著提升了质子陶瓷燃料电池的性能，呈现出优异发电性能，推进了该类电池技术的商业化进程。相关研究成果发表在《*Science*》<sup>14</sup>。

（汤匀 郭楷模）

---

<sup>14</sup> Y. Wu1, B. Zhu, M Huang, et al. Proton transport enabled by a field-induced metallic state in a semiconductor heterostructure. *Science*, 2020, 369, 184-188 DOI: 10.1126/science.aaz9139

# 能源战略研究

## 国际能源署能源技术展望报告评估洁净能源技术创新需求

7月2日，国际能源署发布《能源技术展望：洁净能源创新》特别报告<sup>15</sup>，量化分析了洁净能源技术创新和投资需求，以实现更清洁、更具韧性的净零排放能源系统。报告确定了有助于加速创新周期的关键技术属性，并提出了实现净零排放的五项关键创新原则。报告要点如下：

### 1、洁净能源技术创新和政府的关键作用

更清洁、更具韧性的净零排放未来能源系统将需要一揽子新技术方案，创新是一个不确定且竞争激烈的过程。此过程涉及的参与者：政府、研究人员、投资者、企业家、企业和民间社会都在为技术的开发、改进直至进入市场和部署发挥重要作用。其中政府的作用远远超出了为技术研发提供资金：政府需要制定国家总体目标和优先事项，确定市场预期发展方向，确保知识流动、投资基础设施和促进重大示范项目实施。近70年来，太阳能光伏发电成本几乎持续下降，这一令人瞩目的历史，说明了政府在实现变革中所起的关键作用。

### 2、近几年洁净能源创新投资乏力，但未来发展势头强劲

自2012年以来，洁净能源在全球风险投资交易中所占的份额减少了一半，洁净能源的投资吸引力不及生物技术和信息技术等其他技术领域。值得注意的是，自2011年以来，低碳能源技术的专利申请量每年都在减少。在缺乏政府政策的扶持下，新冠疫情对私营部门为洁净能源创新提供资金产生了迅速而消极的影响，并可能阻碍洁净能源技术的进步。多家能源相关企业报告称，2020年第一季度研发预算同比下降，风投交易数量也有所下降。一些行业还没有切实可行的深度脱碳解决方案，如水泥和钢铁业，在研发方面的支出通常相对较少。

直接或间接解决洁净能源创新问题的措施已经成为一些国家政府政策回应的重点。例如，欧盟实施了最高的碳价，且制定了最多的洁净能源技术部署目标。挪威通过研发和公共采购促进海上运输业脱碳。中国将快速原型制造、公共采购、融资和内部市场部署相结合，在早期技术准备阶段就有效改进了电动汽车和LED等量产产品。日本在能效和其他领域的高标准推动了以市场为导向的创新。在2020年到2025年间，这些政策信号将为洁净能源市场环境的稳步发展提供信心。

### 3、技术创新需要关键技术、时间积累、技术属性等要素的协同作用

实现净零排放需要在关键技术方面进行强有力和有针对性的研发，包括：终端

<sup>15</sup> Clean Energy Innovation Part of Energy Technology Perspectives. <https://www.iea.org/reports/clean-energy-innovation>

用能部门电气化；碳捕集、利用和封存（CCUS）；低碳氢和氢基燃料的使用；生物能源的利用。

将新能源技术推向市场需要时间积累。即使是太阳能光伏、锂离子电池或发光二极管（LED）等清洁能源技术开发的成功例子，从原型到商业化也需要 10 至 30 年的时间。在可持续发展情景下，技术创新需要先发国家向后续国家有效的知识转移，尤其是在最关键的早期应用阶段推动跨国界的传播。

创新周期受不同技术属性所限。例如，与大型工程解决方案相比，小型和模块化技术的资本密集度较低，降低了开发阶段的投资风险。反过来，标准化和大规模生产需要通过竞争进行创新，将改进后的产品更快地推向市场。部门之间的协同作用可以进一步加速这些周期。

技术创新需要关注溢出效应。一个技术领域积累的知识可以用相对较低的成本在其他相关技术中加以利用，并且可以避免额外研发需要。在可持续发展情景中，创新政策刺激了这些协同效应，将使得一些技术领域具有强大的溢出潜力，如电池、电解制氢和燃料电池等领域。

#### **4、需加快洁净能源创新以应对新冠疫情危机**

新冠疫情危机对洁净能源技术创新既是机遇也是挑战。一方面政府通过重新安排和推动包括研发在内的创新，作为刺激措施的一部分，实现向净零排放的长期过渡。另一方面，可能导致政府和企业预算紧缩，致使洁净能源创新步伐放缓。

在更快创新情景下，目前处于原型或示范阶段的技术将使到 2050 年碳减排量比可持续发展情景下高出 75%以上。另外，先进的高能量密度化学电池技术将促进交通电气化的更广泛普及，以及大规模高温工业电加热在化工等行业的广泛应用。2050 年，对氢和氢基燃料的需求将比可持续发展情景增长近 25%。同时，2050 年碳捕集量将增加 50%达到约 75 亿吨/年，几乎是可持续发展情景的三倍。

#### **5、大力关注洁净能源创新，实现能源和气候零排放目标**

为实现净零排放，针对洁净能源技术相关的领域，缩短创新周期应基于五个关键原则：（1）分清轻重缓急，考虑本地需求与优势对支持重点进行跟踪和调整；（2）促进公共研发和市场主导的私营部门创新；（3）平衡价值链中薄弱环节，推动技术创新的实际应用；（4）建立有效的基础设施；（5）进行国际合作以实现区域性成功。

当前需要注意将研发资金维持在计划水平，并考虑在适当的领域有所侧重。以市场为基础的政策和资金支持有助于扩大电解槽和电池等模块化技术的价值链，显著推动其进步。刺激创新的措施可以与相关措施一起实施，如在更广泛的经济激励方案中投资基础设施。

经济复苏措施也为洁净能源创新提供了新的机会，从更长远的角度重塑未来洁净能源布局。可以更新创新政策使其与长期目标保持一致。对重工业和长途运输等

重点示范项目予以重视，可以使低碳技术方案能在 2030 年前更早实现。在电气化、CCUS、氢和生物能源的研发和基础设施方面进行协调投资，也可以显著推动洁净能源转型。

(汤匀)

## IEA：全球电动汽车市场兴旺 未来十年发展前景可期

近期，国际能源署（IEA）发布了《全球电动汽车展望 2020》<sup>16</sup>，在扶持政策的支持以及持续下降的电池成本推动下，全球电动汽车销量快速增长。2019 年，全球电动汽车销售数量超过 210 万辆，创历史新高，使得全球电动汽车累计保有量提升至 720 万辆，同比增长 40%。报告强调，强有力的政策支持和持续进步的技术将会促使电池性能进一步提高、成本进一步下降，从而继续推动全球电动汽车市场持续增长，促进交通运输电气化不断发展。报告系统分析了近期全球电动汽车市场的发展现状和未来发展潜力。报告要点如下：

### 一、过去十年全球电动汽车市场大幅扩张

#### 1、2019 年全球乘用车市场低迷，但电动汽车发展向好

随着两轮车、公交车和卡车电气化技术的进步及其销量的增长，推动了整个电动汽车市场的增长。2019 年，全球电动汽车销量同比增长 6% 突破 210 万辆，创下历史新高，占全球汽车销量 2.6%；电动汽车保有量增长 40% 达到 720 万辆，占全球汽车保有量的 1%。其中，中国电动汽车保有量达到 335 万辆，占全球电动汽车保有量的 47%，是全球最大的电动汽车市场。而雄心勃勃的电动汽车支持政策是刺激电动汽车销量增长的关键驱动因素之一。2019 年，政策措施从直接补贴转向更依赖监管和其他结构性措施（如零排放汽车法规和燃油经济性标准），向行业和消费者释放出了明确的长期信号。

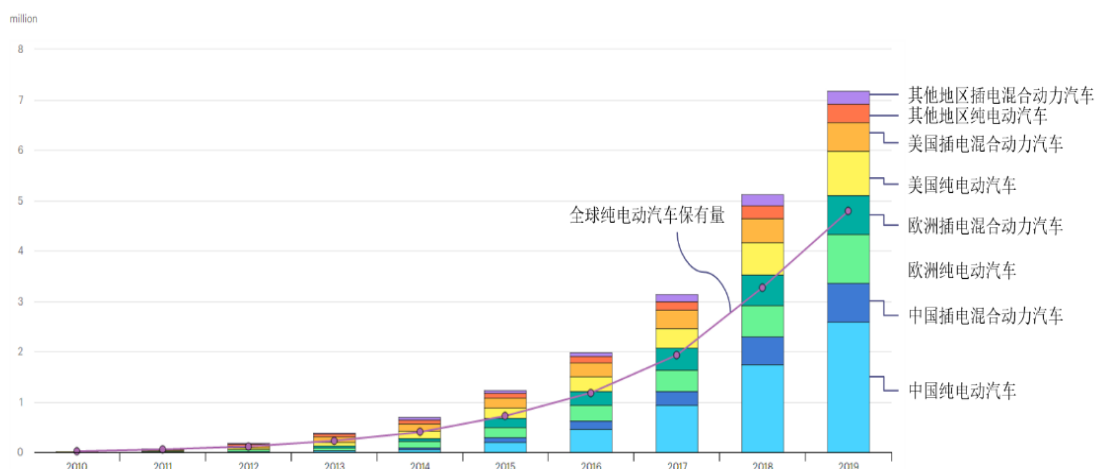


图 1 2010-2019 年全球电动汽车保有量（按地区和车型划分）（单位：百万辆）

<sup>16</sup> Global EV Outlook 2020. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>



新冠肺炎疫情冲击全球产业链，深刻影响全球汽车市场。依据 2020 年 1-4 月销售数据，预计整个 2020 年全球乘用车市场或将萎缩 15%。新冠肺炎疫情同样将影响全球电动汽车市场，但其影响程度低于疫情对整体乘用车市场的影响。预计 2020 年全球电动汽车销量将占汽车销量的 3%左右。

## **2、私人充电桩占主体，但公共充电桩部署速度已超电动汽车销量增速**

2019 年，全球约有 730 万个充电桩，其中约 650 万个是家庭和工作场所的私人乘用车慢速充电桩。便利性、成本效益和各种支持政策是私人充电桩蓬勃发展的主要驱动力。2019 年，公共充电桩占全球轻型车辆充电桩的 12%，其中大部分为慢速充电桩。2019 年，全球公共充电桩（慢速+快速）同比增长 60%，高于轻型电动汽车库存增长。中国继续引领公共充电桩的发展，尤其是快速充电桩。

## **3、中国继续在电动两轮/三轮车和电动公交车市场处于领先地位**

截至 2019 年，全球约有 3.5 亿辆电动两轮/三轮车，中国约占 25%。全球约有 50 万辆在运电动公交车，其中大部分在中国。尽管由于 2016 年开始逐步取消补贴，电动公交车市场出现整体下滑，2019 年新增上牌车量较往年有所减少，但中国多个城市的公交车已接近或全部电气化。未来的公共交通，特别是电动公交车，将在疫情影响、城市交通系统的整体运载能力和政府的持续支持之间取得平衡。

## **二、政府通过更全面的政策组合继续支持电动汽车部署**

### **1、环境和可持续发展目标推动了各级政府对电动汽车的政策支持**

电动汽车是减少人口稠密地区空气污染的关键技术，也是促进能源多样化和温室气体减排目标的理想选择，其优势包括：零尾气排放、比内燃机汽车效率更高、温室气体减排潜力巨大。迄今已有 17 个国家宣布了零排放汽车目标，或是到 2050 年逐步淘汰内燃机汽车。电动汽车的政策行动取决于其市场和技术进展，制定车辆和充电桩标准是广泛部署电动汽车的先决条件。对汽车尾气排放收税有助于提高电动汽车的普及率。车辆购置的财政激励措施以及其他激励措施（如道路收费折扣和低排放区）对于吸引消费者和企业选择电动汽车至关重要。绝大多数市场为个人或企业购置电动汽车提供某种形式的补贴或减税，并出台部署充电基础设施的支持计划。

### **2、政府正在调整政策以支持电动汽车市场转型**

2019 年，政府在购买电动汽车的财政激励支出方面首次出现下降，而消费者购买电动汽车支出和电动汽车总支出继续增加。从单纯政策刺激转向各种监管和财政措施可能会逐渐成为部署电动汽车的主要驱动力，这为电动汽车行业设定明确的目标和长远的愿景。许多监管政策促使汽车制造商销售更多电动汽车或其他更高效的汽车，中国的新能源汽车指令、欧盟碳排放标准以及美国和加拿大部分地区的零排放汽车指令覆盖了全球 60%的电动汽车销量。除了上述的监管条例外，想要进一步

促进交通运输电气化，各国政府还需设定长远愿景并实施多样化的适应性政策措施，包括新的财政计划，如提前预测并调整税收方法，以取代燃油税收入的损失；或者确定基于车辆活动的税收（例如基于距离或拥堵的定价）等。

### **3、政府应对疫情的措施将影响向电动汽车转型的步伐**

2019年，新冠疫情危机带来许多不确定性：从政府和企业加倍努力实现交通电气化的能力，到当前危机导致的低油价和封控措施可能带来的交通出行变化等。随着城市交通封控措施逐渐取消，一些城市正对公共交通的运行频率和满载率进行临时限制，可能导致私人汽车出行量激增。因此许多城市，特别是欧洲的城市，正在迅速制定政策，重新思考城市空间使用问题，并提倡步行和自行车出行。作为经济复苏工作的一部分，国家和地方各级政府正在呼吁重点促进清洁交通发展。

经济刺激计划将包括支持汽车行业的措施（尤其是考虑到对就业的影响），以努力提振主要汽车制造国的经济。尽管这将促进电动汽车的销售，但仍应对电动汽车实施有针对性的措施，确保交通电气化进程顺利进行。主要的刺激措施有旧车抵现金、燃油经济性法规、对充电基础设施的直接支持，以及对企业批量采购电动汽车、电动巴士和电动卡车的低息贷款或公共资金支持，这些措施都有助于推动电动汽车销量持续增长。在实行化石燃料补贴的国家，低油价是逐步取消价格补贴政策的重要机会。

## **三、未来十年交通电气化前景光明**

### **1、为实现《巴黎协定》气候目标，到2030年全球电动汽车保有量需增长30余倍**

电动汽车在实现可持续发展设想中的环境目标、减少空气污染和应对气候变化方面发挥着关键作用。在既定政策情景下，预计到2030年全球电动汽车保有量（不包括两轮/三轮车）接近1.4亿辆，占全球汽车保有量的7%。在可持续发展情景下，预计到2030年全球电动汽车保有量（不包括两轮/三轮车）年均增长36%，达到2.45亿辆，是目前水平的30多倍。

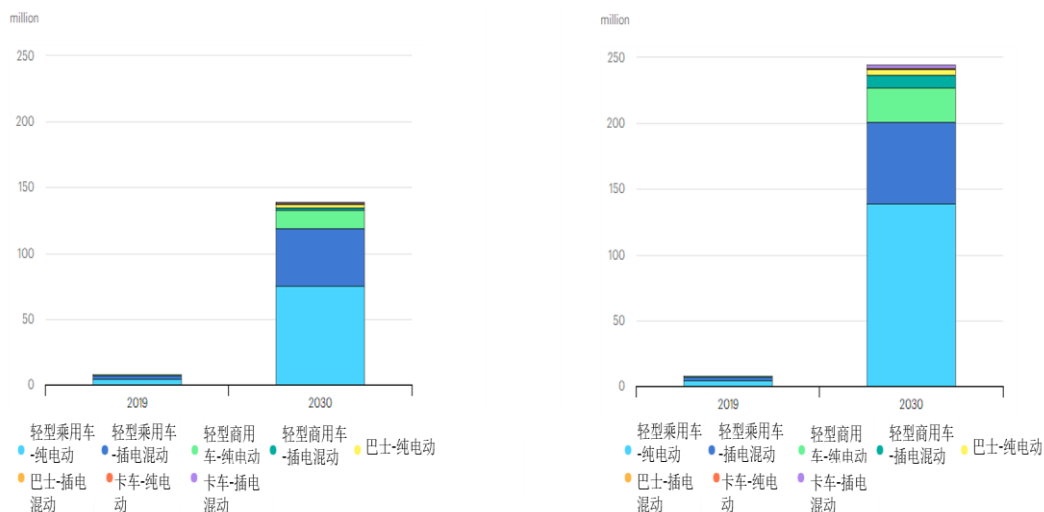


图2 既定政策情景（左图）和可持续发展情景（右图）下2030年全球电动汽车保有量预测（单位：百万辆）

## 2、电动汽车增长推动电池成本下降，从而促进所有车辆类型电气化

电动汽车市场规模扩大将推进电池制造能力提升，进而促进电池成本下降。到2030年，轻型电动汽车（乘用车和商用车）将占电动四轮车的最大份额。随着电气化政策的实施，中国和欧洲将引领这一发展。

电动两轮/三轮车将占电动车的最大份额，因为这一领域最适合快速电气化。未来电动两轮/三轮车市场将主要位于中国、印度和东盟十国。公共汽车电气化将主要在城市地区，预计到2030年城际电动公交车不会取得重大进展。因此，电动公交车保有量将略低于轻型电动汽车。中型和重型卡车的电气化也将主要发生在城市，预计到2030年电动卡车的销售量和保有量将是各种电动车辆中最低的。

## 3、电动汽车的推广显著增加了电力需求，但减少了石油消费和温室气体排放

在既定政策情景下，预计2030年全球电动汽车（包括两轮/三轮车）的电力需求达到550太瓦时，约为2019年水平的6倍。在可持续发展情景下，预计2030年全球电动汽车电力需求相比2019年增长近11倍，达到近1000太瓦时。慢速充电桩的电力需求将占电动汽车电力需求的大部分。

2019年，全球电动汽车的推广减少了近60万桶/日的石油产品消费。在既定政策情景下，到2030年全球电动汽车将减少250万桶/日的石油产品消费；在可持续发展情景下，到2030年全球电动汽车将减少420万桶/日的石油产品消费。2019年，全球电动汽车电力来源共排放5100万吨CO<sub>2</sub>，约为同等内燃机汽车排放量的一半，相当于避免了5300万吨CO<sub>2</sub>排放。在两种情景下，到2030年电动汽车“从井到轮”全生命周期排放量都将远低于内燃机汽车排放量：在既定政策情景下将减排一半，而在可持续发展情景下将减排2/3。

（汤匀 郭楷模）



## 《洁净能源科技动态监测快报》

编辑出版：中国科学院武汉文献情报中心

联系地址：武汉市武昌区小洪山西 25 号 (430071)

联系人：陈伟 郭楷模 岳芳

联系电话：(027) 87199180

电子邮件：[energy@whlib.ac.cn](mailto:energy@whlib.ac.cn)