



新能源革命的技术瓶颈与路径：储能+氢能+智能

欧阳明高

ouymg@tsinghua.edu.cn

2023年2月9日武汉



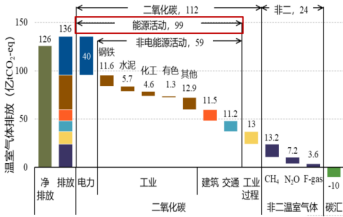
新能源革命的技术瓶颈与路径：储能+氢能+智能

1. 中国新能源革命的瓶颈技术
2. 清华储能氢能智能技术研发
3. 新能源革命的技术路径展望

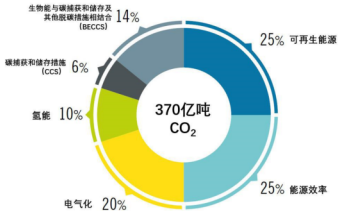


碳中和与新能源革命

我国温室气体排放现状 (2020年)
(能源活动占主体)



全球支撑碳减排主要技术路径 (2022)
(新能源占主体)



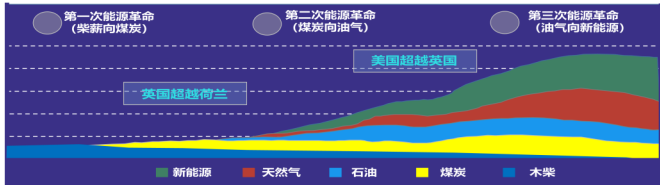


碳中和与新能源革命

能源转型历程与新能源革命

- ◆ 第一次能源革命：**动力**：蒸汽机， **能源**：煤炭， **能源载体**：煤， **交通工具**：火车
- ◆ 第二次能源革命：**动力**：内燃机， **能源**：石油和天然气， **能源载体**：汽/柴油， **交通工具**：汽车
- ◆ 第三次能源革命？ **动力**：各种电池， **能源**：可再生能源， **能源载体**：电和氢， **交通工具**：电动车

第四次工业革命：以可再生能源为基础的**绿色化**和以数字网络为基础的**智能化**



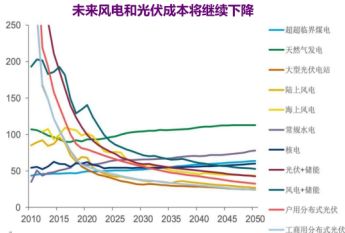
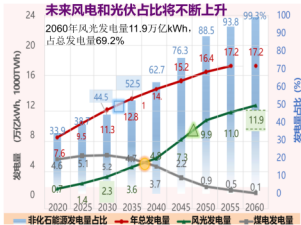


中国新能源发展特色与优势

电源端：可再生能源装机增量全球第一，光伏出货量占全球近70%

□ 2035年，风电光电将占**80%以上**的装机容量和**40%以上**的电量。

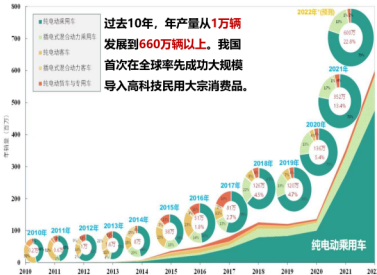
□ 2035年，光伏发电成本可降至**0.1元/度**，风电成本可降至**0.2元/度**。





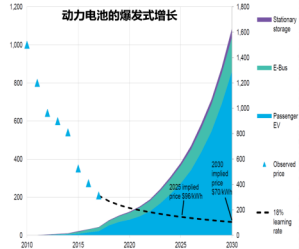
中国新能源发展特色与优势

负荷端：新能源汽车销售量全球第一，动力电池产量占全球近70%



Lithium-ion battery pack price (\$/kWh)

Demand for lithium-ion batteries (GWh/year)





新能源技术系统整合面临的挑战与瓶颈

新能源革命的内涵：**五大支柱**、**四大板块**、**三大挑战**、



五大支柱

- 一、向可再生能源转型（尤其是光伏与风电）；
- 二、集中/分布结合式系统，建筑变为微型发电厂；
- 三、用氢气，电池等技术存储间歇式能源；
- 四、发展能源（电能）互联网技术；
- 五、电动汽车成为用能，储能并回馈能源终端；

四大板块

硅能：光伏与电力电子、 储能：物理与化学储能等、
氢能：可再生能源制绿氢、智能：车网互动、能源互联网

三大挑战

储能（绿电储存）、氢能（绿色氢能）、智能（智慧能源）



新能源技术系统整合面临的挑战与瓶颈

新能源革命的核心：**两大**主体系统、**一个**核心瓶颈

- ◆ **两大新能源系统的互动性**：新能源汽车需要绿电与绿氢才能成为真正的新能源汽车；新能源的发展又需要新能源汽车的电池和氢能技术解决发电波动问题
- ◆ **两大新能源系统的相似性**：共性技术相似，都是储能技术：各种储能电池和电动汽车车网互动、变流器与电力电子、燃料电池与电解水制氢系统、氢能储运技术、氢载体氨用于交通动力和发电能源等；

新能源动力系统



相似性



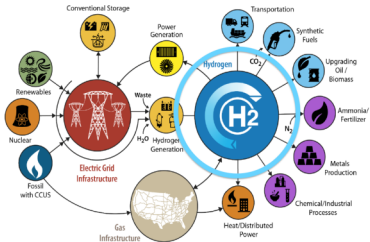
新能源电力系统

一个核心瓶颈——新型电力系统的电网灵活性。出路在于氢能+储能+智能



氢能与氢储能：氢能汽车为先导带动绿色氢能全产业链发展

国际氢能委员会预计，净零排放情境下，2050年需要零碳氢（绿氢）6.6亿吨，占终端能源的22%。到2050年累计减少800亿吨CO₂排放，相当于将全球变暖限制在1.5-1.8℃所需CO₂减排量的11%。



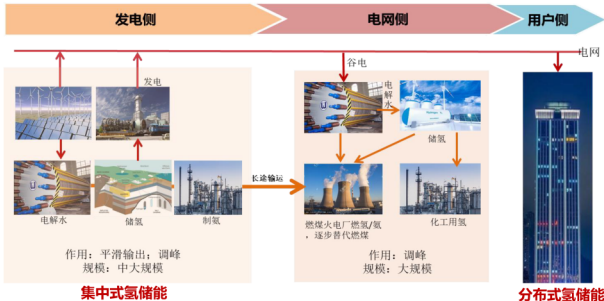
低碳社会中绿色氢能与电力互融互补具有同等重要的战略地位



中国未来十万亿规模潜力的氢能全产业链



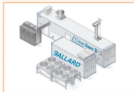
氢能与氢储能：长周期大规模可再生能源的氢储能方式





氢能与氢储能：长周期大规模可再生能源的氢储能方式

多元化氢/氨发电系统



MW级燃料电池发电系统



100MW级氢燃气轮机发电系统



氨燃气轮机发电系统



氢或氨混烧锅炉火电机组

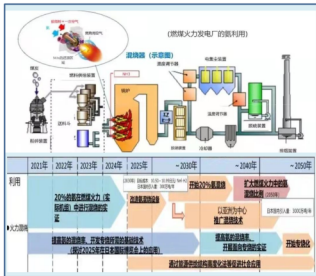
西门子880MW氢燃气轮机，联合循环效率64%，寿命3.3万小时



氢能与氢储能：集中式氢储能

根据国情选择合适的发电技术路线

日本的氢燃料主要是以氨为载体通过海运进口的。因此,选择推进以氨为燃料的掺烧锅炉和氨燃气轮机作为主导技术路线



可再生能源制氢合成氨，制备成常温运输的液氨，成本低廉、化学性质稳定，再投入燃气轮机进行火力发电，实现了可再生能源长周期存储、长距离运输，并助力火力脱碳



日本SIP¹绿氨合成发电项目

- JGC公司在2018年底于日本郡山示范工厂完建设了可再生能源制氢并合成氨。继而以合成氨为燃料发动47kW的微型燃气轮机

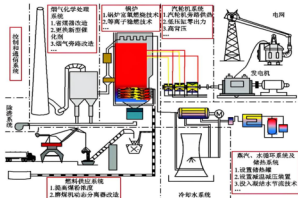
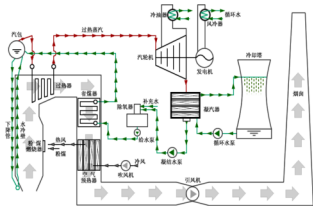
日本零碳氨价值链构建时间线²



氢能与氢储能：集中式氢储能

根据国情选择合适的发电技术路线

中国绿氢燃料的主体将会是国内风电和光伏发电制氢。因此，不必全盘引进日本技术路线。应当首先针对西北部大型能源基地尤其是集中式大型风电光伏基地的调峰煤电厂的灵活性改造，开展锅炉的氢掺烧（这与日本推行氢燃料电池轿车和中国推动纯电动类似）



■ 国内试点项目灵活性改造后的最小出力：
纯凝机组30%-35%，供热机组40%-45%



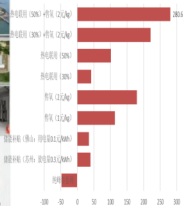
氢能与氢储能：分布式氢储能

- ◆ 预计MW级8小时以上长时分布式氢储能系统成本2025年可以与电池储能竞争，初步具备经济性；
- ◆ 氢储能效率偏低，需要对电解制氢系统和燃料电池发电系统进行耦合设计；
- ◆ 必须综合考虑热的利用，开展以氢为核心载体的多能联产联供系统可获取显著的收益。



台州大陈海岛氢能综合利用示范工程建设集“风电制氢-储氢-燃料电池热电联供”为一体的综合能源系统。配置质子交换膜电解水制氢系统，制氢规模100kW（20Nm³(1.79kg)/h）；配置高压储氢系统，储氢容量200Nm³(18kg)；配置质子交换膜燃料电池系统，发电功率100kW。项目配置统一的制氢与燃料电池的余热回用系统，回收所有余热供给海水淡化。质子交换膜制氢产生氧气可供海产养殖用，并预留氢气供给端口，满足海岛加氢站用氢的远景需求。

MW级氢储能8h峰谷套利年经济性(万元)

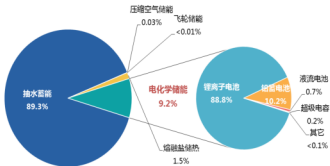




储能与储能电池：动力电池大规模产业化与电化学储能电站

- ◆ 2022年，国内新增投运新型储能项目装机规模达6.9GW/15.3GWh，与2021年相比增长180%。
锂离子电池仍然占据新型储能的主导地位，新增投运装机规模首次突破6GW，占比近90%
- ◆ 随着全球电动化进入高速发展阶段，带动中国动力电池行业飞速发展，2025国内电池年需求/出货量预计超过1200GWh；相比车用动力电池，储能电池用量小，容易满足需求。

2020中国储能总装机量比例



电力/储能电池总装机量





储能与储能电池：动力电池大规模产业化与电化学储能电站

电化学储能与锂离子电池的安全挑战

- ◆ 近年来，储能电站、新能源汽车、电动自行车，锂离子电池安全事故时有发生。
- ◆ 据国家监控平台数据电动汽车电池安全事故概率目前为万分之0.5，与传统车大体相当，无致命事故。
- ◆ 电动自行车安全事故2021年共发生1.8万起，死亡57人，受伤157，说明技术水平和安全规范起决定作用
- ◆ 电池储能电站电池容量一般在超过1万千瓦时，安全风险增加，技术难度加大，需要建立安全保障体系。

储能电站火灾



电动汽车火灾



电动自行车火灾





储能与储能电池：集中式储能电站与分布式电池储能

- ◆ 集中式电池储能电站需要不断优化安全保障技术，并通过成倍提高循环寿命将储电成本降至0.2元/千瓦时
- ◆ 利用电动汽车电池与电网双向充放电的车网互动式储能提供了成本低安全性高的电化学分布式储能新途径

	固定式储能电站 	分布式电动汽车储能 
01 容量	100% 	 x% - 总量变量：桩网互动的车辆数量随机 - 个体变量：EV参与电网互动的能量随机
02 时间	定 	 X 不同日期的同一时间段车辆能够参与电网互动概率不同
03 空间	壹 	 N 辆车可在不同地域与桩网互动，产生的收益不同，同时规模级的车辆空间变化会带来电网传输变化
04 固定成本	增 	零  - 设备：低 - 土地：无
05 安全风险	高 	低  - 电池数量少，事故概率低 - 消防与灭火难度低

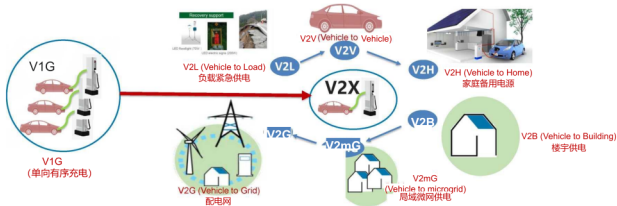


智能与车网互动：基于车网互动的智慧能源系统

广义车网互动概念

- V1G :单向有序充电, 仅改变汽车充电时间/速率 (例如中午吸收多余太阳能, 负载平衡) ;
- V2G :包含反向功率流, 可以提供局域微网和配电网的多种尺度灵活性调节功能;
- V2X:车与车之间供电, 楼宇供电, 负载紧急供电, 家庭备用电源等;

实现V2G的前提是电动车在停止运行时要通过双向充电桩与电网联接, 如果用换电模式, 车载电池的储能功能难以发挥
车网互动需要用户、企业、地方政府共同参与构建能源互联网平台, 三方都有收益, 还具有推动新能源发展的绿色效益。

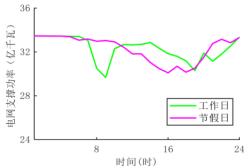
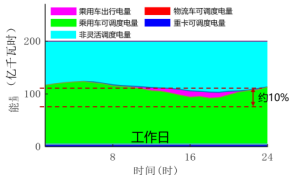




智能与车网互动：基于车网互动的智慧能源系统

车网互动能量聚合潜力

- ◆ 2040年，中国电动汽车保有量达到3亿辆，每辆车平均电量大于65千瓦时，则车载储能容量超过**200亿千瓦时**，与中国每天消费总电量基本相当。
- ◆ 考虑出行需求，乘用车、重型卡车、物流车每日可参与电网调度的平均电量分别为**104亿千瓦时**、4.3亿千瓦时、0.8亿千瓦时，日内可调度能量波动 $\pm 10\%$ 。
- ◆ 乘用车停充补电采用15kW双向充电桩，根据日出行概率分布，新能源汽车对电网功率支撑的能力达到**29~35亿千瓦**，约为当年全国电网非化石装机功率的一半。



2040年，新能源汽车储能容量和对电网的功率支撑能力

智能与车网互动：基于车网互动的智慧能源系统

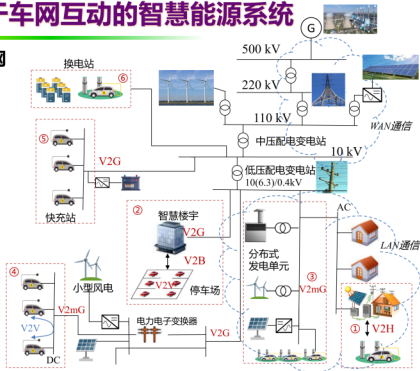
基于车网互动的用户侧能源互联网

低压配电网

- ①V2H：与家庭分布式光伏协同（农村地区典型场景）
- ②V2B：城市楼宇和停车场互动，集群后可参与V2G
- ③V2mG(AC)：配合小型火电机组和可再生能源单元
- ④V2mG(DC)：直流微网系统，集群后可参与V2G

中压配电网

- ⑤快充站V2G
- ⑥换电站V2G



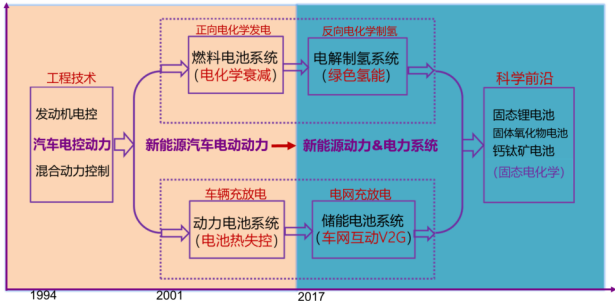


1. 中国新能源革命的瓶颈技术
- 2. 清华储能氢能智能技术研发**
3. 新能源革命的技术路径展望



清华大学《新能源动力系统》科研团队

聚焦能源动力学科前沿，从汽车电控动力到新能源汽车电动力再到新能源动力&电力系统，经历了三个研究发展阶段



清华大学《新能源动力系统》科研团队



电池储能-绿色氢能-智慧能源
储能+氢能+智能三位一体学术体系

张家口/鄂尔多斯氢能中心与创业企业群

燃料电池/电解池与氢储能系统

1. PEMFC/PEMEC
2. SOFC/SOEC
3. 碱性电解与氢安全
4. 氢储能系统

清华大学电池安全实验室
清华-丰田燃料电池联合研究中心
中美电动汽车国家级联合研究中心

宜宾电池研究院与创业企业群

动力电池与电化学储能系统

1. 电池热失控与热蔓延
2. 智能电池与智能管理
3. 新体系与全固态电池
4. 车用电池系统与电池储能系统

智能动力与智慧能源系统

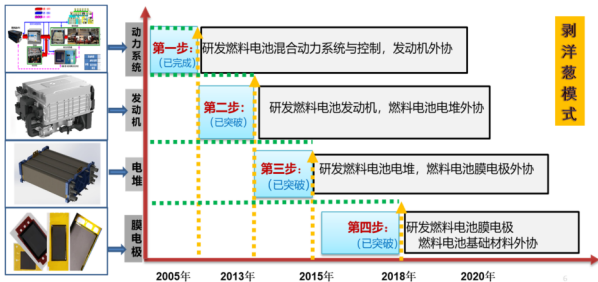
1. 分布式驱动系统与滑板底盘
2. 超级快充/快换耦合补电系统
3. 光-储-氢-充-放互动能源系统
4. 车网互动智慧能源系统V2X

南京智能动力创新中心与创业企业群——深圳智慧能源创新中心与创业企业群



氢能：氢储能与氢燃料电池系统研发与产业化

通过自上而下层层深入的研发模式，掌握了氢能燃料电池的全技术链整套技术





氢能：氢燃料电池系统研发与产业化

培育出科创板/港股上市公司，中国氢能第一股——亿华通科技集团，氢燃料电池产品市场占有率国内领先



双极板连续辊压生产



燃料电池电堆集成



燃料电池系统集成



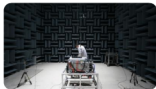
EMC测试



防水测试



湿热测试



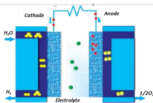
噪声测试



氢能：氢储能与氢燃料电池系统研发与产业化

面向近中远期应用，已全面开展三种电解水制氢研发与产业化(AEC\PEMEC\SOEC)
培育出思伟特和海德氢能两个制氢装备公司

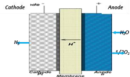
固体氧化物电解 (SOEC)



清华SOEC实验平台
Tsinghua SOEC
Platform



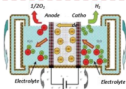
质子交换膜电解 (PEMEC)



清华PEMEC实验平台
Tsinghua PEMEC
Platform



碱性电解 (AEC)



清华碱液制氢设备
Tsinghua Alkaline
Hydrogen
Production Equipmen

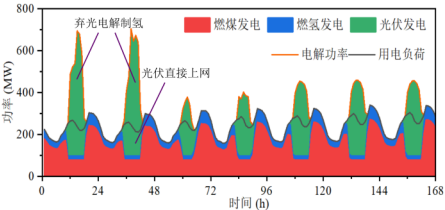




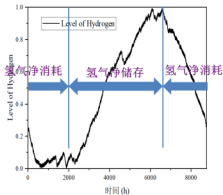
氢能：氢储能与氢燃料电池系统研发与产业化

氢储能示范：光伏+氢储能+火电灵活性运行示范工程可行性分析（掺烧20%）

- 单位电力碳排放强度由950g/kWh降低为569g/kWh
- 氢储能实现能量季节性转移（3-9月氢气净储存，10-2月氢气净消耗）



7天运行特性



全年储氢容量变化 27



氢能：氢储能与氢燃料电池系统研发与产业化

氢储能示范：光伏+氢储能+火电灵活性运行示范工程可行性分析（掺烧20%）

在大部分场景下，弃光制氢+氢储能+火电20%掺氢燃烧的方案可实现更优经济性

紫色框内比燃煤发电更具经济性的区域

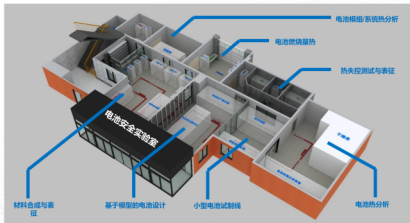
综合电力成本 (元/kWh)		碳税价格 (元/吨)								
		0	50	100	150	200	250	300	350	400
煤炭价格 (元/吨)	500	0.2180	0.2460	0.2741	0.3022	0.3303	0.3583	0.3864	0.4145	0.4426
	700	0.2587	0.2868	0.3149	0.3430	0.3710	0.3991	0.4272	0.4553	0.4833
	900	0.2995	0.3276	0.3557	0.3838	0.4118	0.4399	0.4680	0.4960	0.5241
	1100	0.3403	0.3684	0.3965	0.4245	0.4526	0.4807	0.5088	0.5368	0.5649
	1300	0.3811	0.4092	0.4372	0.4653	0.4934	0.5215	0.5495	0.5776	0.6057
	1500	0.4219	0.4499	0.4780	0.5061	0.5342	0.5622	0.5903	0.6184	0.6465
	1700	0.4627	0.4907	0.5188	0.5469	0.5749	0.6030	0.6311	0.6592	0.6872

储能：清华大学电池安全实验室（校本部+宜宾基地）



针对储能电池安全防控瓶颈问题，2010年建立清华大学电池安全实验室，2021年又建立宜宾实验基地（投资2亿元）。实验室现有教师10人，在站博士后28人，博士生35人，硕士生42人，总研发人员超过110人。

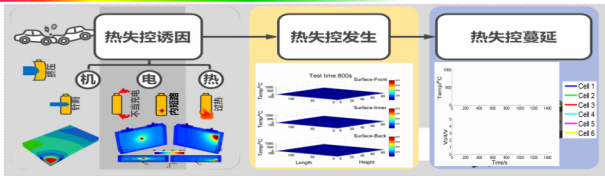
实验室具备完善的电池材料热反应分析、单体热失控测试、模组热蔓延实验评价、多传感信息提取、数值仿真平台等研究实验设备，具有开展电池材料、单体、系统的动力性、耐久性、安全性研究的测试条件。



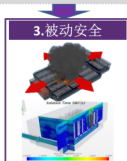
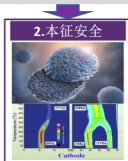
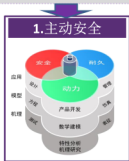


储能：清华大学电池安全实验室（校本部+宜宾基地）

电池热失控过程



电池安全技术





储能：动力电池安全技术研发与产业化

- ◆ 2011年以来，与全球企业和研究机构开展动力电池安全技术研发与产业化，
- ◆ 2011年以来，发表电池安全SCI论文超过300篇，ESI高被引论文25篇，**排名全球第一**
- ◆ 2022年10月，应邀成为**国家储能电站安全监控平台**专家委员会主任单位，并与**国家市场监督管理总局**筹建联合研究中心；

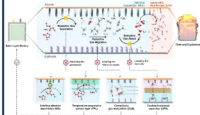


储能：从电池安全研究 到 安全电池开发

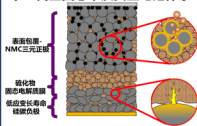


本征安全 → 固态电池

单体热失控副反应动态释能机制

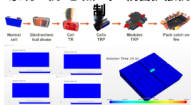


下一代全固态本质安全电池体系

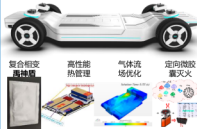


被动安全 → 安全电池

系统“机-电-热-气”耦合扩散机制



高安全不起火电池系统

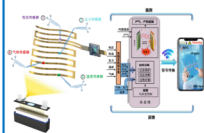


主动安全 → 智能电池

全生命周期云边端协同安全管理



先进传感与智能电池





智能：车网互动智慧能源系统关键技术开发

◆**园区场景：**以多层次硬件安全和软件监控技术为核心，构建面向园区的**V2X智慧系统**



高安全储能预制舱系统



高安全储能+电动汽车充电集成系统



V2X光储充一体化场景
场景综合能源运营方案

平台运营者视角

各类应用场景
进行精细化能源管控

实时掌控终端分布情况

智慧能源平台与安全监控



有序充电与双向充电系统



智能：车网互动智慧能源系统关键技术开发

◆住宅场景：面向市郊V2H+光储充系统的软硬件与通讯技术开发

针对家庭建筑场景的智能V2G桩、ABC
光伏组件和分布式安全储能产品



7kW V2G桩



光伏组件



分布式储能

设备层

能源路由器管理多个分布式能源终端
智能电表实现分时和双向计费
智能插座主动控制可调负荷



能源路由器



智能电表



智能插座

控制层

后端零C云管理界面：状态监测与控制信息

前端用户App：能流与碳流可感知



后端管理平台



用户App

管理层

双向电力电子器件开发



车载双向充电桩



桩端双向电源模块

能量管控逻辑设计



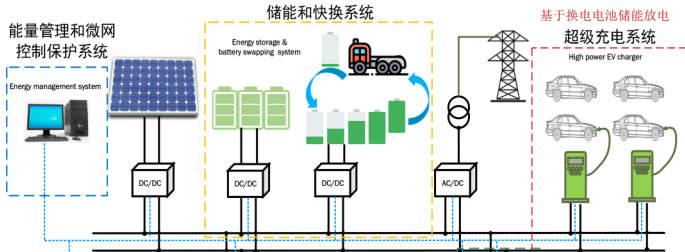
能量管理PaaS底座搭建





智能：车网互动智慧能源系统关键技术开发

◆ 交通场景：光 - 储 - 充 - 换一体化互补型智慧能源系统——电动汽车时代的“加油站”





智能：车网互动智慧能源系统关键技术开发

全球首个

集超充、重卡换电、光伏发电、智能微网一体的
综合示范平台

(清华新能源动力系统团队提供全套技术)



轿车350千瓦超级快充：5分钟充电200公里
轿车北方冬季快速加热：7摄氏度/分钟
重型电动卡车电池快换：5分钟/次



智能：车网互动智慧能源系统关键技术开发

◆ 车网互动与智慧储能四大聚合平台开发

信息监测与预测平台：

出行和负荷分析与电池安全预警

传感数据融合
与AI预测

价格机制，影响设备
和虚拟电厂的状态

能源交易与市场服务平台：

价格机制设计影响设备的可调度状态

负荷聚合与虚拟电厂平台：

可调设备在一定范围的集总管理

能量管理平台：

设备间的能量流动管理

形成虚拟电厂，
连接输配电系统

能量

可调的能量聚合

信息平台层

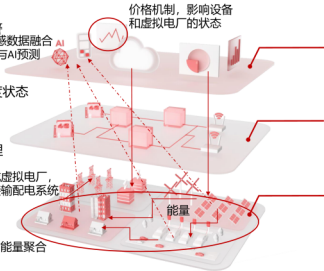
能量管理、负荷聚合与虚拟电厂、数据监测与预测、电能量市场交易服务四大平台

通讯和网关层

微网控制器、能源路由器、边缘网关等通讯终端

功率/能量设备层

光伏、风电、储能、电动汽车、建筑负荷等能源终端



智能：车网互动智慧能源系统关键技术开发

- ◆ 清华团队车网互动与快充快换示范项目：车网互动在京-津-冀-蒙、粤-港-澳两大都市圈示范落地，清华大学孵化企业与华润、壳牌中国、爱旭光电、北京电力、南网电动等电力与能源企业形成战略合作。

张家口：清华壳牌冬奥综合示范平台
集超充、重卡换电、光伏发电、智能微网一体



乌包鄂：鄂尔多斯-智锂物联
光储充换1000km干线补电网



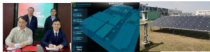
北京通州：清华-北京电力
副中心车网互动平台与示范



深圳：壳牌 南网电动
南网电动-昇科能源车网互动虚拟电厂示范
壳牌中国-昇科能源智慧能源综合服务示范港



佛山：爱旭光电-链宇科技-光储充放微网群示范



香港：华润-昇科能源 电池银行研发中心





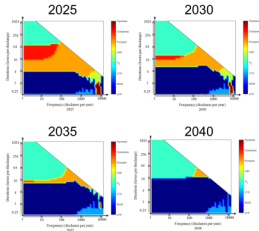
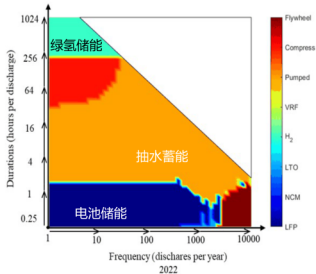
新能源革命的技术瓶颈与路径：储能+氢能+智能

1. 中国新能源革命的瓶颈技术
2. 清华储能氢能智能技术研发
- 3. 新能源革命的技术路径展望**



基于成本竞争力的新型储能技术的未来发展路线图

储能系统成本竞争性比较——未来技术发展



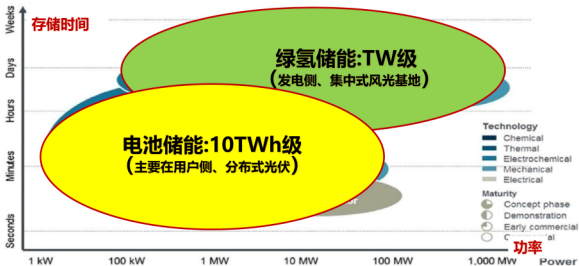
锂电和氢能在2030后在多数频域时段具有竞争优势

面向碳中和的低成本大规模电池和氢能技术前景



储能技术呈现多样化，其中电池和氢能两者互补，共同构成主流储能方式

Storage time



¹⁾ Electro-Thermal Energy Storage

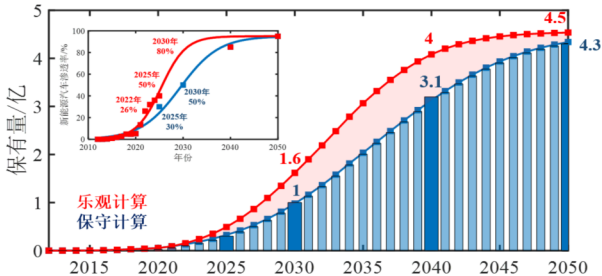
²⁾ Compressed Air Energy Storage

³⁾ Adiabatic Compressed Air Energy Storage



面向碳中和的新能源电动汽车发展前景

新能源汽车快速普及，2030年新能源汽车保有量达到1亿辆~1.6亿辆



基于国家统计局和工信部装备中心数据，采用清华大学新能源动力系统团队预测模型测算



面向碳中和的低成本大规模车网互动前景

◆ 未来十年电动汽车智慧能源生态（万亿级产业）

黄金组合：分布式光伏+电池储能+车网互动+物联网+区块链

1T：光伏进入**10亿千瓦**时代

10T：电池进入**100亿千瓦时**时代

1亿：电动汽车进入**亿辆**时代

◆ 2060电动汽车智慧能源生态（十万亿级产业）

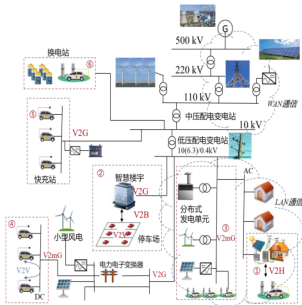
黄金组合：用户侧分布式光伏+车网互动V2X+物联网+区块链

2T：分布式光伏进入**20亿千瓦**时代

10T：车网互动进入**100亿千瓦时**时代

4亿：电动汽车进入**4亿辆**时代

（车载电池容量250亿千瓦时）





面向碳中和的中国新能源电力系统展望

- ◆ **我国东北、华北北部、西北地区是主要的风电、光伏、煤电能源基地：**适宜通过建设电化学电池储能电站，并在经济可行的前提下**将现有煤电调峰电厂的煤分阶段逐步替换为当地富余风电光伏制取的绿氢或绿氨，改造成氢储能调峰电厂，再加上其它储能方式补充配合，最终形成以氢储能为主体的综合储能系统。**在平抑波动后，通过特高压输电，将电输送到中东南部及沿海经济发达地区。
- ◆ **在中东南部及沿海经济发达地区，除了特高压远距离供电外，还有大量火电厂：**适宜将**火电厂改造为发电功率灵活调节并带热储能功能的热电联产电厂**（其中煤的碳排放也需要采用氢/氨等燃料替代或者碳捕捉等技术解决）。在此基础上采用抽水蓄能，加上电化学电池储能等其它储能方式补充配合，形成综合的储能与灵活性调节体系，并通过高压输电网进行电力输送。
- ◆ **在广大的用户负荷终端：**适宜发展分布式光伏、配合电池储能和低压配电网以及各种微电网，形成分布式市场化电力系统网络。随着新能源汽车的普及，预计2030年新能源汽车保有量超过一亿辆，充电负荷将快速增长至城市配电网的容量上限，有序充电与车网互动将逐步成为刚需。因此，**未来基于电动汽车的车网互动式电池储能有可能逐步替代独立的电池储能产品，成为分布式电池储能的主体。**

让我们共同迎接第三次能源革命和第四次工业革命

