

# 院士报告 | 欧阳明高：柔性电力系统的全周期储能技术

欧阳明高 国际能源研究中心 2023-12-15 19:18 Posted on 陕西



## 柔性电力系统的全周期储能技术

欧阳明高

ouymg@tsinghua.edu.cn



# 柔性电力系统的全周期储能技术

## 内容提要

- ◆ **全周期储能的背景：**双碳战略-储能需求-储能比较
- ◆ **长周期电制氢储能：**燃料电池-电解制氢-绿氢储能
- ◆ **中周期电化学储能：**被动安全-主动安全-本质安全
- ◆ **短周期电动车储能：**智能动力-光储充换-车网互动



# 中国新能源革命将提前到来?

## 面向碳中和与新能源革命背景

- ◆ **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: 蒸汽汽车
- ◆ **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: 燃油车
- ◆ **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

2023年11月15中美发表联合声明: 支持到2030年风电光伏装机增至三倍, 中国2030预计达到21~25亿千瓦, 风光发电量大约25%~30%之间, 非化石能源发电总量超过50%。2030新能源汽车预计达到1亿辆。绿氢达到1千万吨。进入新能源革命爆发期

## 随着可再生能源发电比例快速上升对电网的冲击将越来越严重

根据国际能源署 (IEA), 按照电网吸纳间歇性可再生能源的比例划分四个阶段:







# 柔性电力系统的储能需求分析

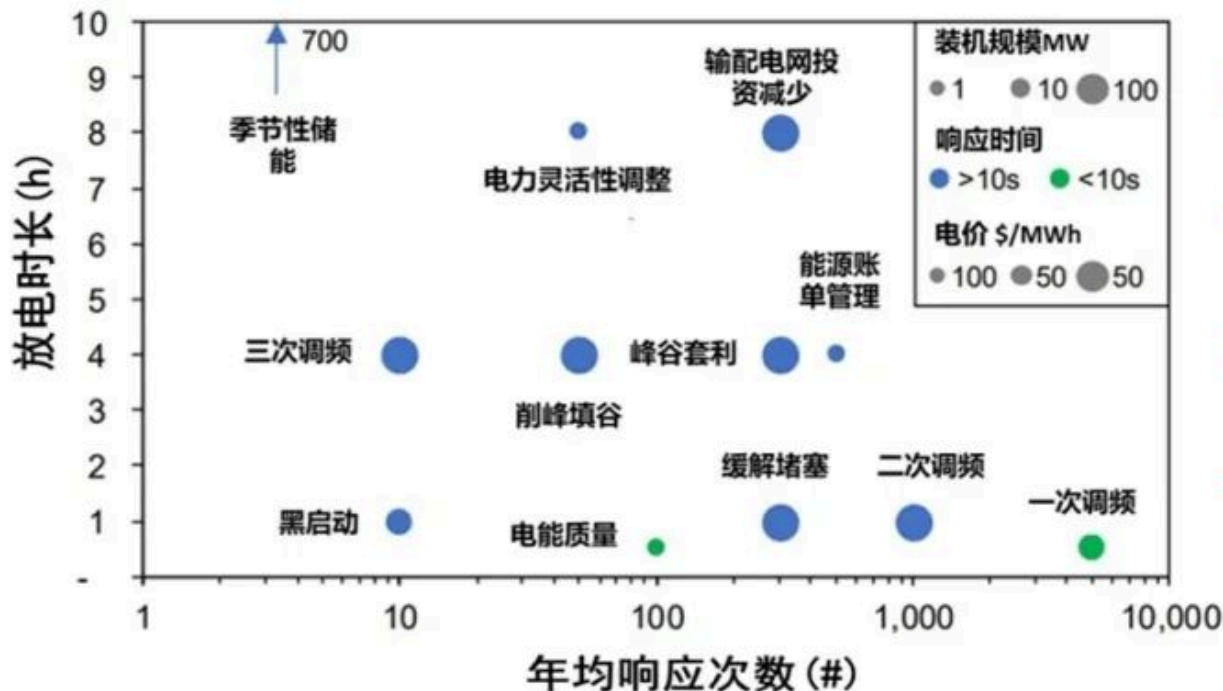
## 电力系统对各类储能技术需求：位置维度

 <p>风电光伏集中式发电</p> <p>①抑制负荷波动 平滑功率输出 有利于电网的调度</p>  <p>火电厂发电</p> <p>②火储联合调频 提高火电厂爬坡能力 提高调度指令的跟踪能力</p>  <p>分布式小型光伏/风光互补发电</p> <p>③提高新能源消纳 ④黑启动</p>	 <p>电网</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="808 655 1070 863"> <p>频率稳定</p>  </div> <div data-bbox="1093 655 1346 863"> <p>电压稳定</p>  </div> </div> $P_{gen} - P_{load} = J\omega_g \frac{d\omega_g}{dt}$ $Q = \frac{U}{X_{\Sigma}} (E \cos \delta - U)$ <p>①调频（有功功率） ②调压（无功功率） ③调峰 ④系统备用：旋转备用/非旋转备用 ⑤减少配电网投资</p>	 <p>工商业</p>  <p>通信机房、数据中心</p>  <p>居民</p>  <p>V2G</p>  <p>①削峰填谷 ②配电系统扩容 ③应急供电 ④V2G电网稳定支撑</p> 
<b>发电侧</b>	<b>电网侧</b>	<b>用户侧</b>



# 柔性电力系统的储能需求分析

## 电力系统对各类储能技术需求：时间维度



- **峰谷套利：**  
放电时长4小时，一年放电300次
- **一次调频：**  
放电时长0.5小时，一年放电5000次
- **季节性储能：**  
放电时长700小时，一年放电3次
- **输配电网投资减少：**  
放电时长8小时，一年放电300次

O. Schmidt, S. Melchior, A. Hawkes, and I. Staffell, "Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies," Joule, vol. 3, no. 1, pp. 81–100, 2019



# 柔性电力系统的储能需求分析

## 电力系统对各类储能技术需求：空间维度

**点：中东部和南部密集发电点**  
**火电机组+高压输电网+抽水蓄能**  
中国优势特色：火电装机容量世界第一，热电联产

**线：三北、西南通过“线”外送**  
**能源基地+特高压输电+储能电站**  
中国优势特色：特高压输电网络世界第一

**面：全国各地面上负荷**  
**负荷+配电网+分布光伏+电动车**  
中国优势特色：光伏装机量、电动汽车保有量世界第一

## 中国电力系统的点线面特征

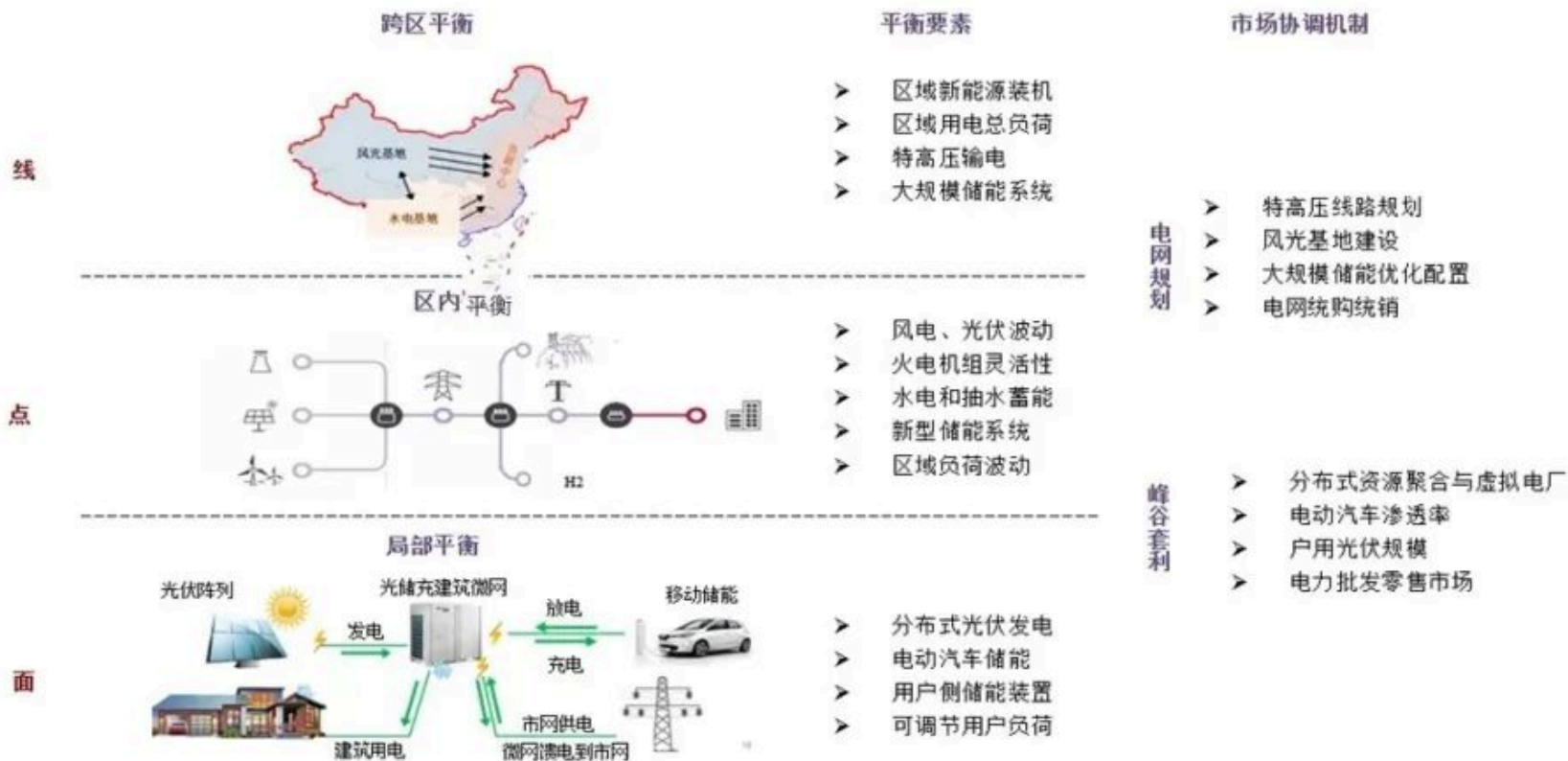






# 柔性电力系统的储能需求分析

## 电力系统对各类储能技术需求：空间维度



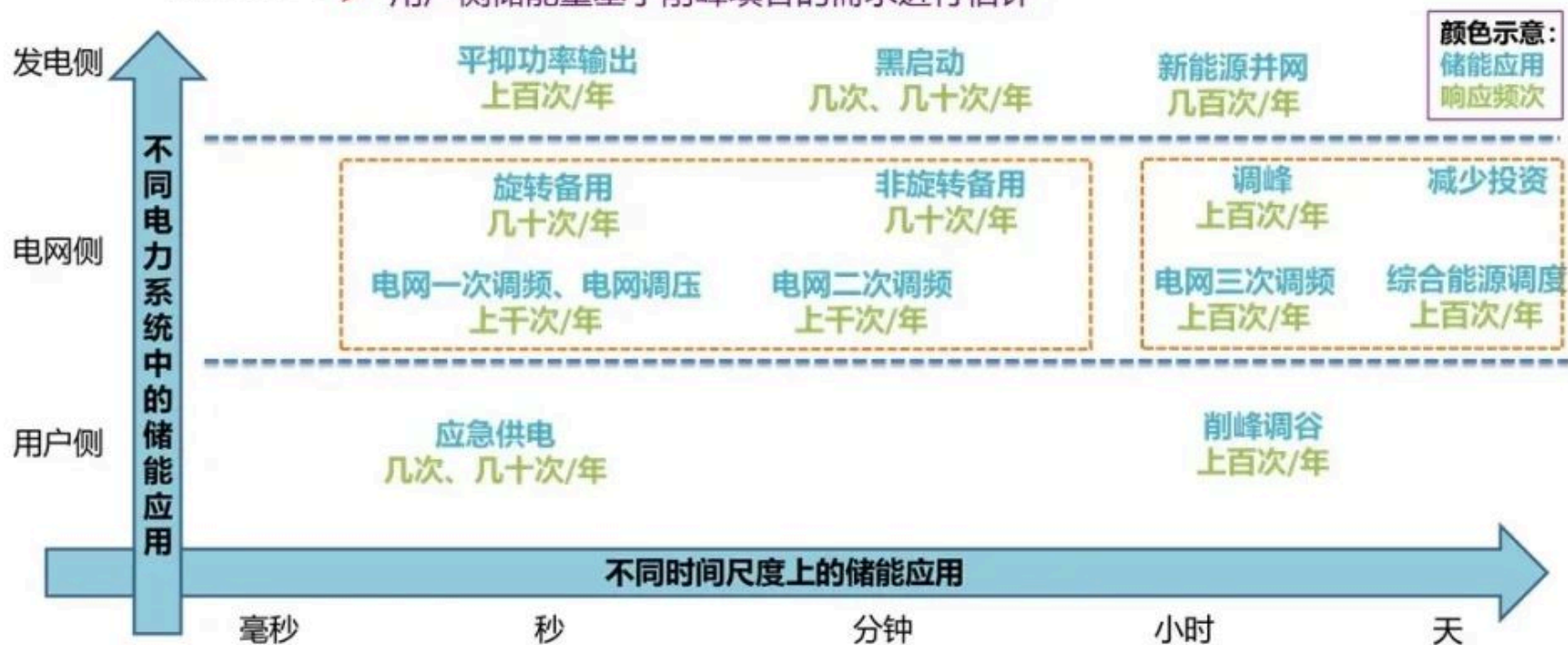


# 柔性电力系统的储能需求分析

## 电力系统对各类储能技术需求：时空维度

### 储能需求估算原理

- 发电侧储能量基于平抑功率波动和新能源并网的需求进行估计；
- 电网侧储能量基于调频调压、调峰的需求分别估计；
- 用户侧储能量基于削峰填谷的需求进行估计



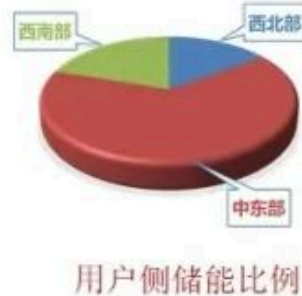
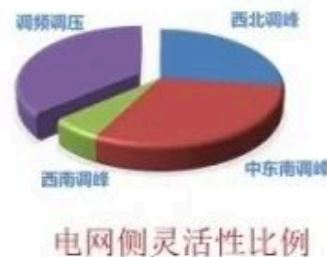




# 柔性电力系统的储能需求分析

## 2030年电网储能总需求

- ◆ 2030年，预计集中式风电装机5.7亿kW、集中式光伏5.3亿kW、分布式光伏5.1亿kW
- ◆ 电网的灵活性需求呈现电网侧和发电侧需求高，用户侧需求低的特点，总需求预计7.1亿kW。
- ◆ 发电侧总储能需求预计2.2亿kW/8.8亿kWh；电网侧调峰灵活性需求预计2.2亿kW，调频调压灵活性需求预计1.3亿kW；用户侧总储能需求预计1.4亿kW/4.9亿kWh

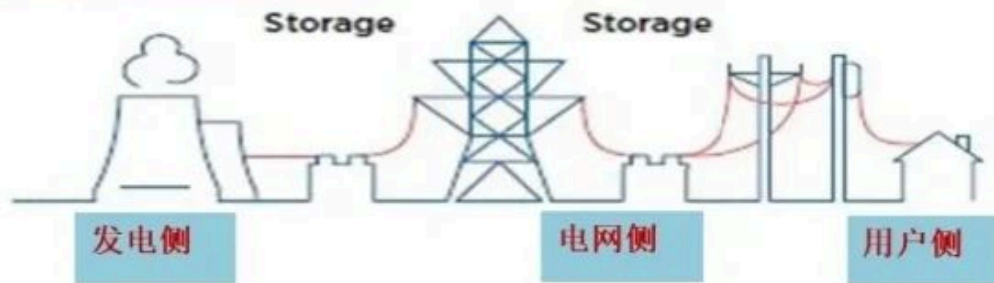




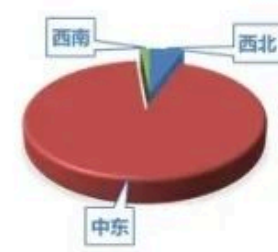
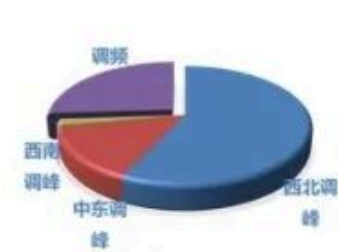
# 柔性电力系统的储能需求分析

## 2060年电网储能总需求

- ◆ 2060年，预计风电装机17亿kW、集中式光伏14亿kW、分布式光伏41亿kW。
- ◆ 电网的灵活性需求呈现用户侧需求高，发电侧和电网侧需求低的特点，总需求预计34亿kW。
- ◆ 发电侧总储能需求预计6.4亿kW/25.5亿kWh；电网侧调峰灵活性需求预计5.6亿kW，调频调压灵活性需求预计2.0亿kW；用户侧总储能需求预计20亿kW/90亿kWh



2060年光伏、风电装机量





# 储能技术经济性比较分析与趋势预测

## 各种主要储能技术性能比较

	磷酸铁锂LFP	三元NCM	钛酸锂LTO	氢储能	液流电池	抽水蓄能	压缩空气	飞轮储能
输出功率 (MW)	0.01-50	0.01-50	0.01-50	0.1-1000	0.05-500	200-3000	5-500	0.05-1000
响应速率	毫秒级	毫秒级	毫秒级	分钟级	毫秒级	分钟级	分钟级	<2ms
放电时长	0.25-15h	0.25-15h	0.25-5h	分钟-多天	1-24h	2-24h	6-24h	数秒-数分钟
装机能量成本 (元/kWh)	1200-2000	1500-2500	5000-8000	20-150	500-1500	50-800	20-300	10000-40000
装机功率成本 (元/kW)	300-2000	300-2000	300-2000	5000-12000	1100-9000	4000-15000	3000-6000	1500-2500
充放循环效率 (%)	85-95%	85-95%	85-95%	30-50%	65-85%	60-80%	40-70%	80-90%
循环次数 (次)	4000-8000	3000-5000	8000-15000	10000-30000	5000-20000	20000-50000	>13000	数万-百万
搁置寿命/年	5-15	5-15	5-20	15-30	15-20	40-60	20-40	1-15

[1]何颖源,等.储能的度电成本和里程成本分析[J].电工电能新技术,2020,38(09):1-10.

[2]张平,等.电池储能技术及经济性分析[J].储能科学与技术:1-10[2022-03-12]



# 储能技术经济性比较分析与趋势预测

## 主要储能系统成本竞争性比较——成本假设（2022年）

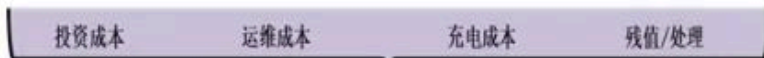
	LFP	NCM	LTO	氢储能	液流电池	抽水蓄能	压缩空气	飞轮储能
能量成本 (元/kWh)	1350	1750	6000	76.5	2000	454.5	166.7	25190
功率成本 (元/kW)	900	630	560	8400	5000	5454	5583	2155
能量运维成本 (元/kWh输)	0.0195	0.0195	0.0195	0	0.0065	0.0065	0.026	0.013
功率运维成本 (元/kW·yr)	65	65	65	240	100	52	26	45.5
循环次数 (圈)	5333	2500	6667	6250	15600	33250	21125	171600
搁置寿命 (年)	10	7	18	17	16	55	39	36
维护周期 (圈)	3250	2000	8000	2500	1000	7300	1460	22500
维护成本 (元/kWh/次)	0	0	0	1800	200	700	604.5	1300
建设周期 (年)	1	1	1	1	0.5	3	2	1
充放综合效率 (%)	0.90	0.90	0.90	0.40	0.75	0.78	0.44	0.88



# 储能技术经济性比较分析与趋势预测

**平准化储能度电成本 (LCOS, levelized cost of storage)**，或称全生命周期成本，是一个从平准化度电成本 (LCOE, levelized cost of electricity) 衍生出来的概念

- 功率成本
- 容量成本
- 中期维护成本
- 维护周期
- 功率运维成本
- 能量运维成本
- 充放电深度
- 电池衰减
- 充电价格
- 充放电效率
- 功率成本
- 容量成本
- 中期维护成本
- 维护周期
- 残值系数



全生命周期发电量

- 年循环次数
- 充放电效率
- 循环衰减
- 日历衰减
- 建设周期

全生命周期度电成本

全生命周期发电量：

$$E_{all} = (Cyc_{annual} \cdot DOD \cdot Cap_{e,nom}) \cdot \eta_{RT} \cdot \sum_{n=1}^N \frac{(1 - Cyc_{Deg})^{(n-1) \cdot Cyc_{annual}} \cdot (1 - T_{Deg})^{n-1}}{(1 + i_{rate})^{n+T_c}}$$

年循环圈数
充放效率
单次循环衰减
年日历衰减
建设周期  $T_c$

衰减计算方法 (按逐圈指数衰减)：

$$Cap_{e,nom} \cdot (1 - Cyc_{Deg})^{Cyc_{annual}} = 80\% \cdot Cap_{e,nom}$$

$$Cyc_{Deg} = 1 - 80\% \frac{1}{Cyc_{life}}$$

单次循环衰减量      循环寿命圈数

$$T_{Deg} \left[ \frac{\%degradation}{year} \right] = 1 - 80\% \frac{1}{T_{shelf}}$$

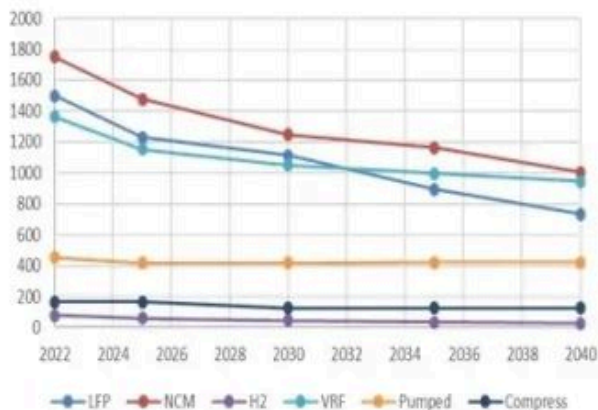
年日历衰减量      日历寿命 (保质期)



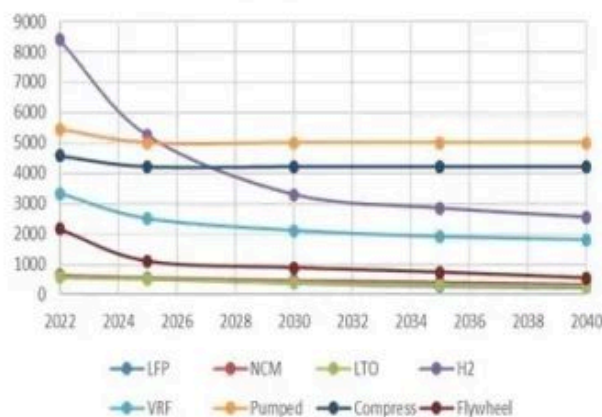
# 储能技术经济性比较分析与趋势预测

## 储能系统成本竞争性比较——未来技术发展假设

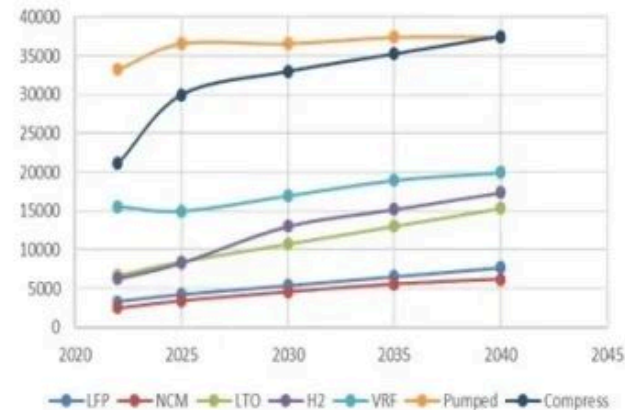
能量成本下降趋势 元/kWh



功率成本下降趋势 元/kW



循环寿命变化/次数



储能技术投资成本未来发展趋势预测

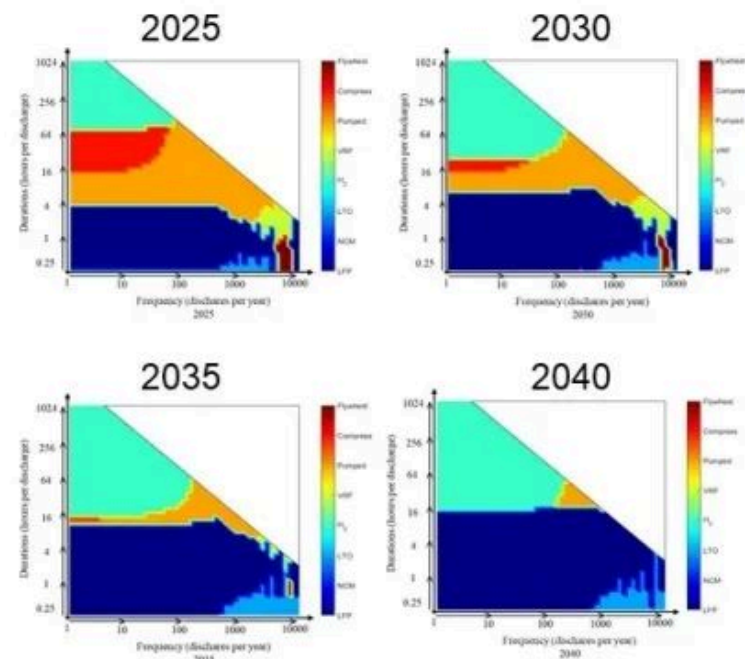
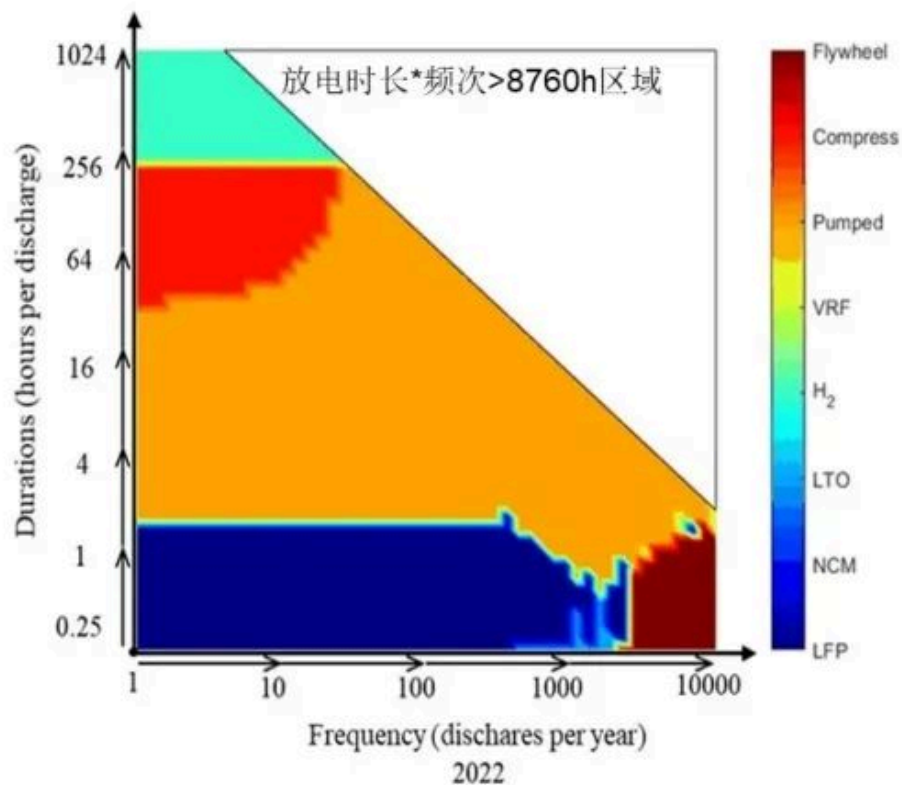
	LFP	NCM	LTO <sup>(m)</sup>	氢储能	液流电池	抽水蓄能	压缩空气	飞轮储能
2020	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2025	62%	65%	68%	79%	69%	102%	93%	79%
2030	42%	45%	52%	63%	53%	105%	87%	63%
2035	33%	36%	42%	52%	43%	108%	75%	52%
2040	29%	32%	34%	46%	39%	110%	61%	46%





# 储能技术经济性比较分析与趋势预测

## 储能系统成本竞争性比较——未来技术发展

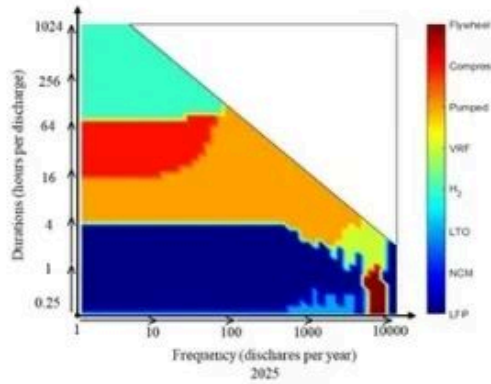


锂电和氢能在2030后在多数频域时段具有竞争优势

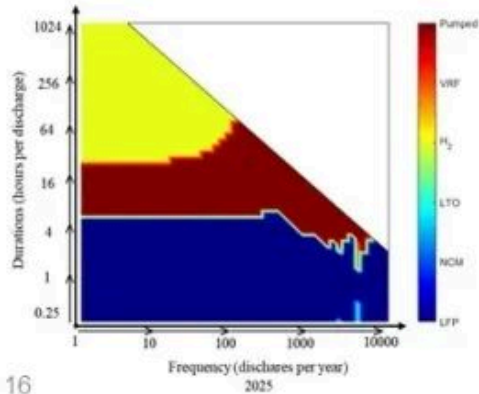


# 储能技术经济性比较分析与趋势预测

## 储能系统成本竞争性比较——结果比对

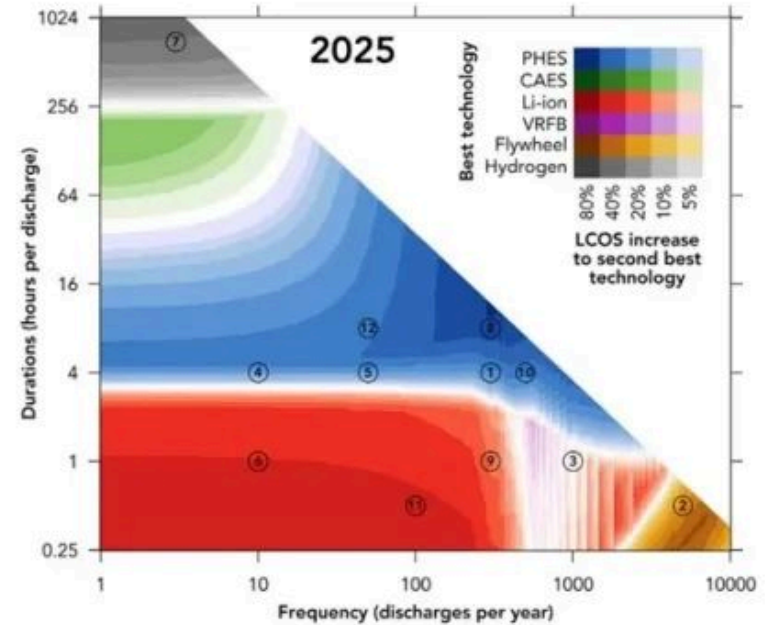


基准场景



锂电较低成本场景

Joule文献结果

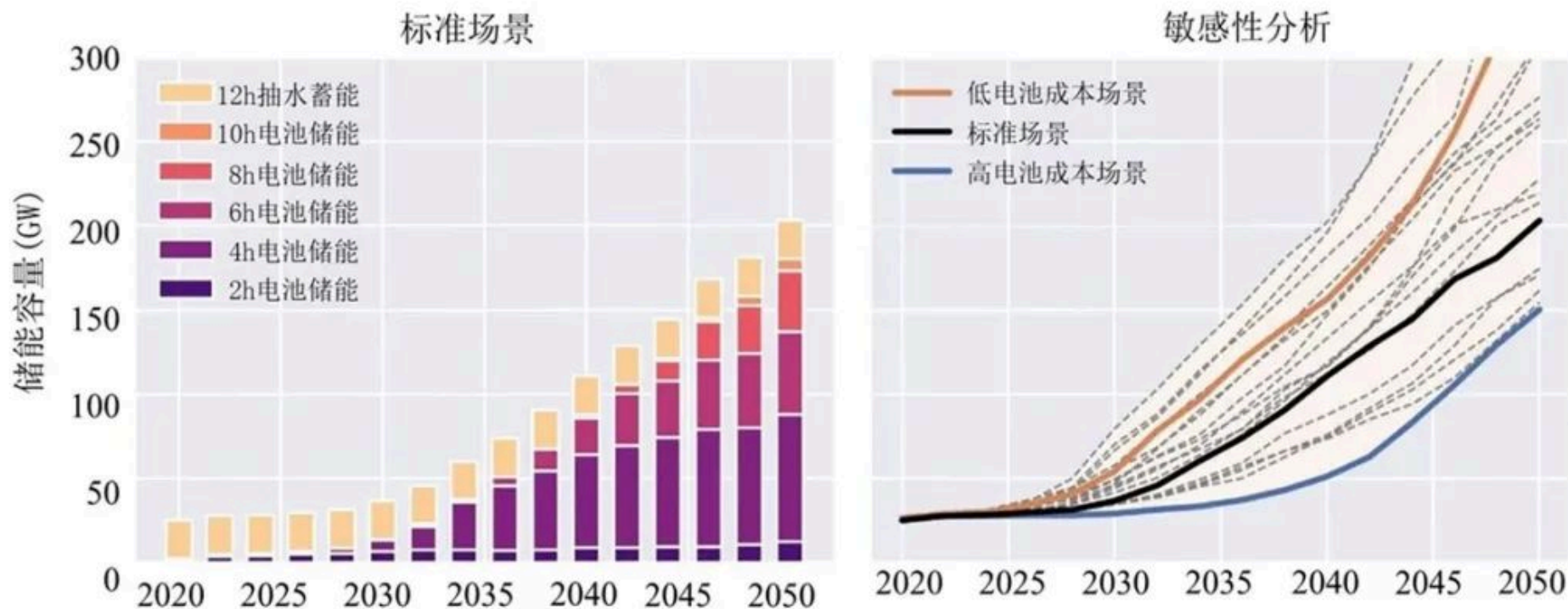


锂电和氢能竞争优势应更强



# 储能技术经济性比较分析与趋势预测

## 美国国家实验室预测的美国储能容量预测结果



FRAZIER A W W C. Economic Potential of Diurnal Storage in the U.S. Power Sector[J]. 2021



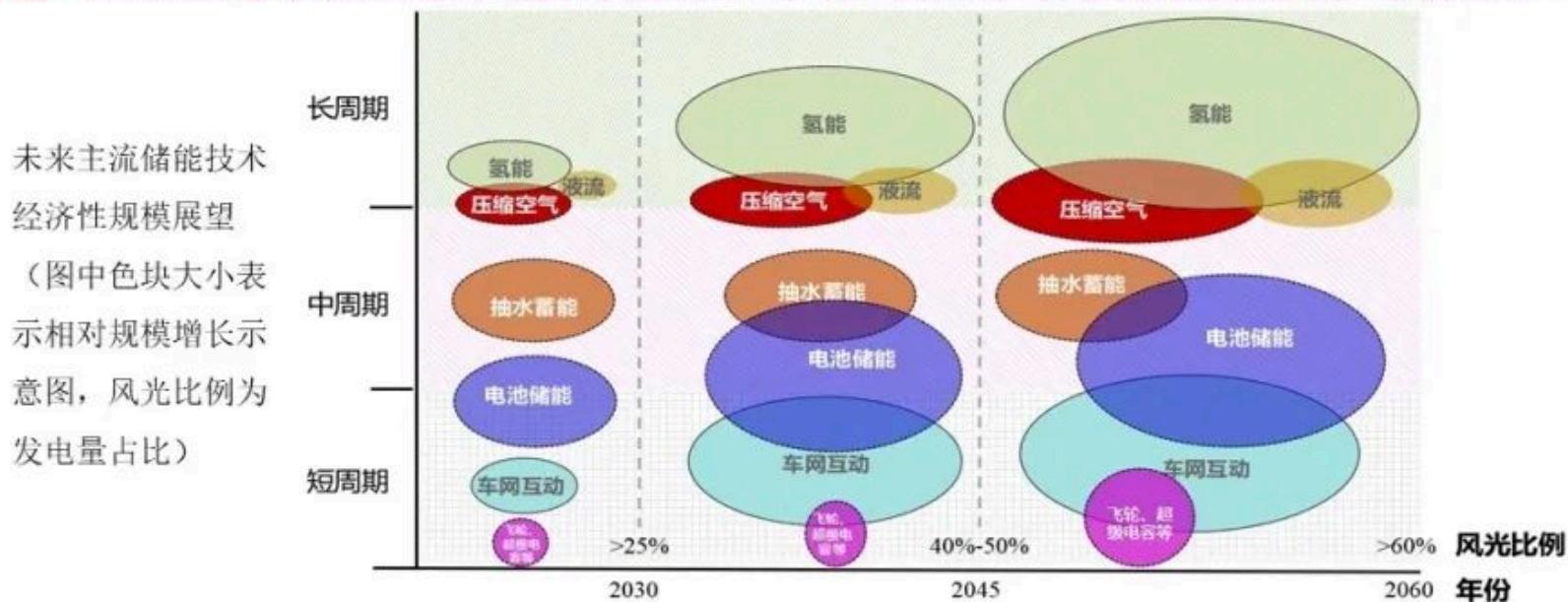


# 储能技术经济性比较分析与趋势预测

## 基于经济性比较的中国主流储能系统预测

**2030年前:** 根据国家规划, 到2030年建成1.2亿kW的抽水蓄能, 将在较长一段时间内发挥中长周期储能的作用。

**2030年后:** 面临间歇性可再生能源发电量比例超过25%, 将主要采用三种主流的储能技术, 可分为长、中、短类型。



- 1.长时间大规模 (20小时以上、日间及跨季节)**, 将主要采用氢能的方式, 液流电池、压缩空气储能等作为补充;
- 2.中周期中等规模 (5~20小时)**, 电池储能电站将占主导 (70%以上), 其余由抽水蓄能、压缩空气、液流电池等提供支撑;
- 3.短周期分布式小规模 (0~5小时)**, 车网互动储能将占80%以上, 其余通过飞轮储能、超级电容和电化学集中储能等方式补充。



# 清华大学《新能源动力系统》科研团队

2021-2040: 推动我国新能源全方位革命, 探索产学研全新模式与零碳系统解决方案







# 柔性电力系统的全周期储能技术

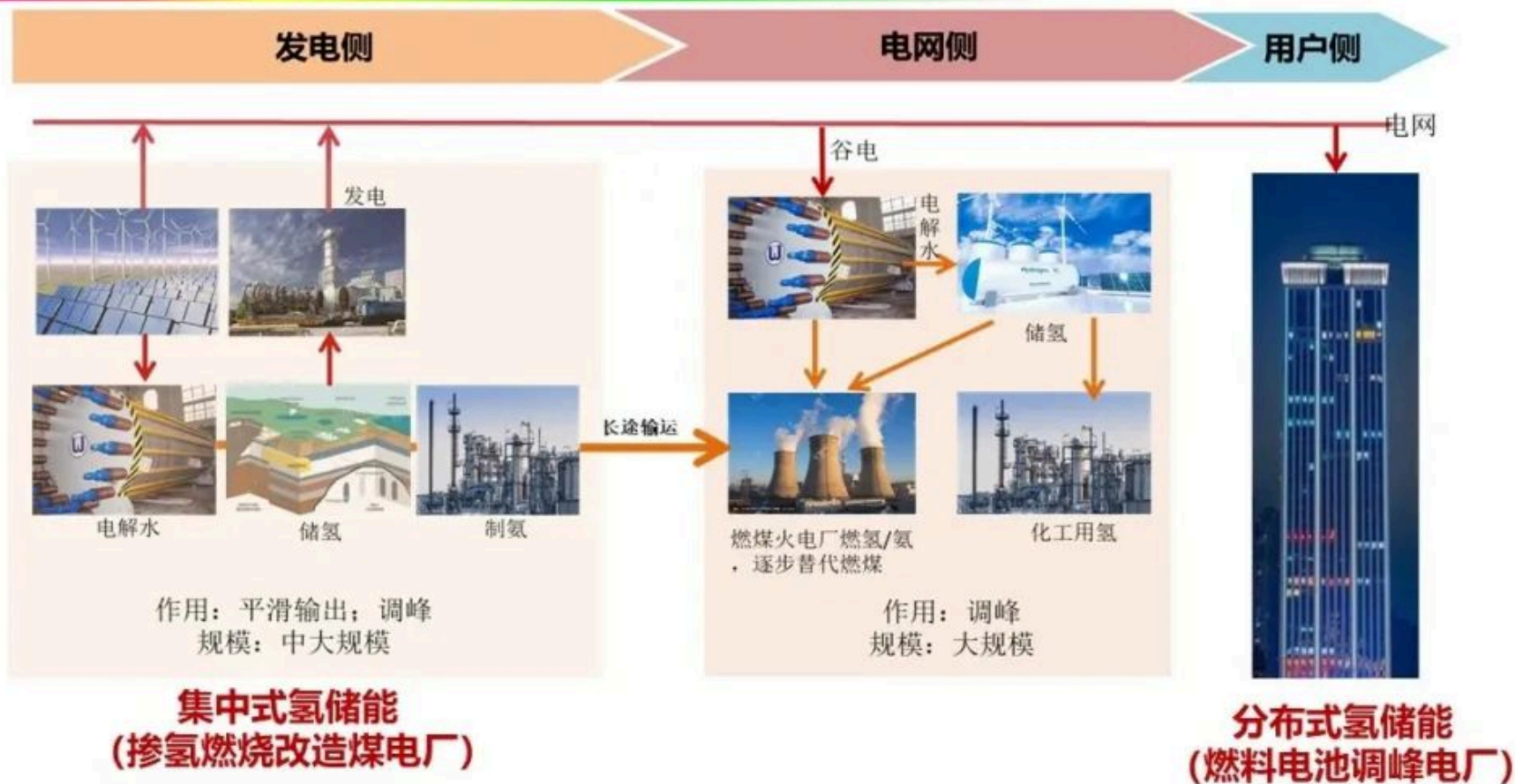
## 内容提要

- ◆ **全周期储能的背景：**双碳战略-储能需求-储能比较
- ◆ **长周期电制氢储能：**燃料电池-电解制氢-绿氢储能
- ◆ **中周期电化学储能：**被动安全-主动安全-本质安全
- ◆ **短周期电动车储能：**智能动力-光储充换-车网互动





# 长周期大规模可再生能源氢储能系统研发





# 氢能与氢储能：长周期大规模可再生能源氢储能系统研发

根据具体国情针对应用场景选择合适的发电技术路线；大规模发电采用锅炉氢掺烧，逐步提高掺氢比例

多元化氢/氨发电系统，各国选择不同技术路线

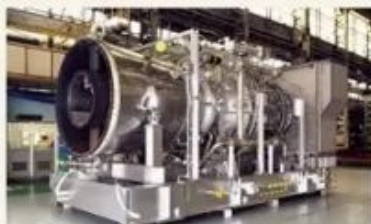
中国可先针对西北部大型能源基地尤其是集中式大型风电光伏基地的调峰煤电厂的灵活性改造，开展锅炉的氢掺烧。



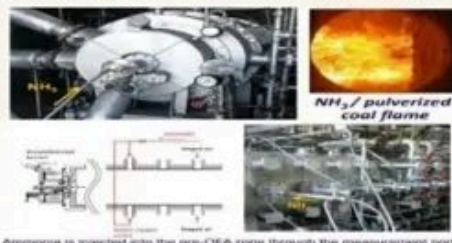
MW级燃料电池发电系统



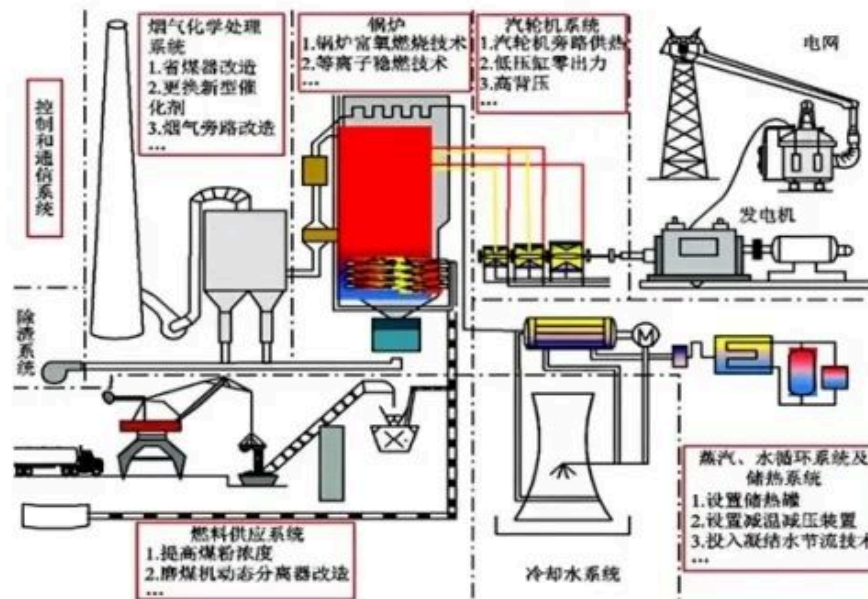
100MW级氢燃气轮机发电系统



氨燃气轮机发电系统



氨或氨混烧锅炉火电机组



热电厂灵活性改造后最小出力：纯凝机组30%-35%，供热机组40%-45%。

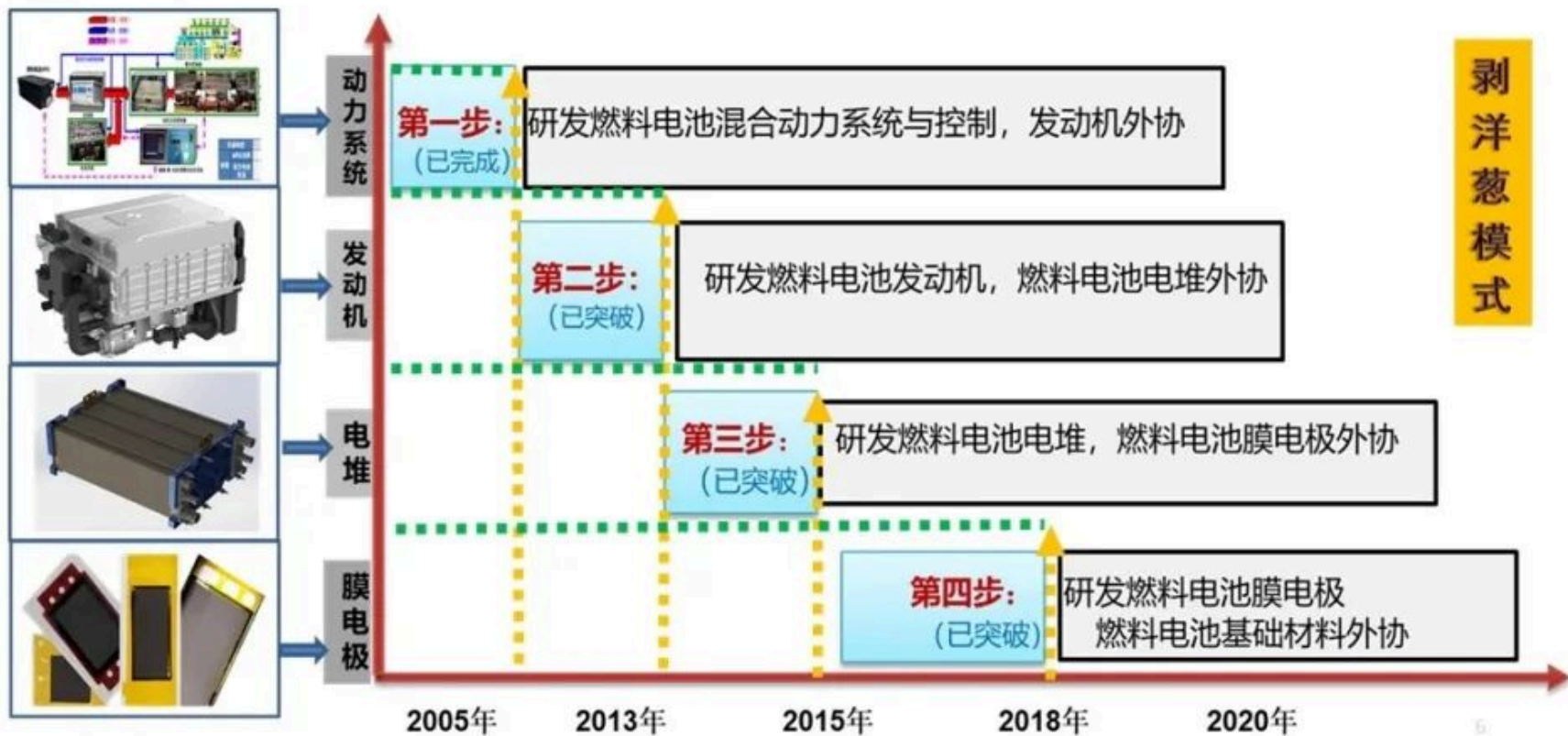
通过氢掺烧改善燃烧稳定性，拓宽运行范围，降低碳排放。





# 清华-亿华通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







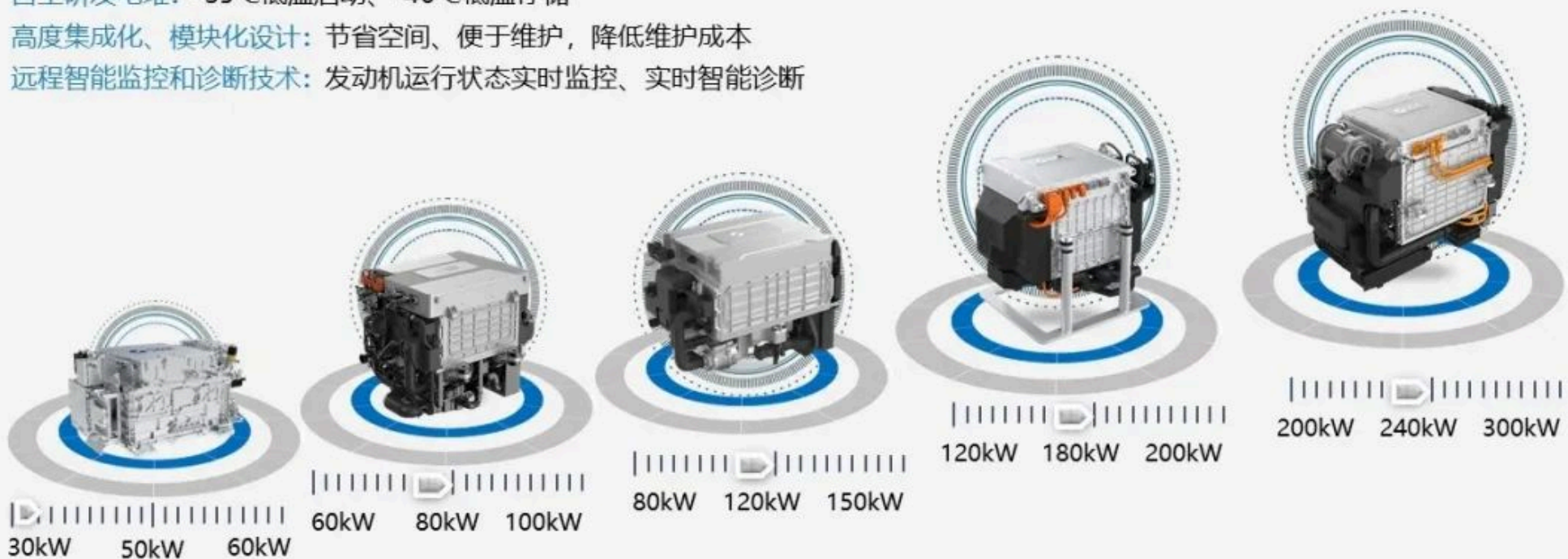
# 清华-亿华通氢燃料电池系统研发与产业化

◆ 自主研发燃料电池发动机，功率覆盖30kW-240kW，零部件国产化率达100%

自主研发电堆：-35°C低温启动、-40°C低温存储

高度集成化、模块化设计：节省空间、便于维护，降低维护成本

远程智能监控和诊断技术：发动机运行状态实时监控、实时智能诊断



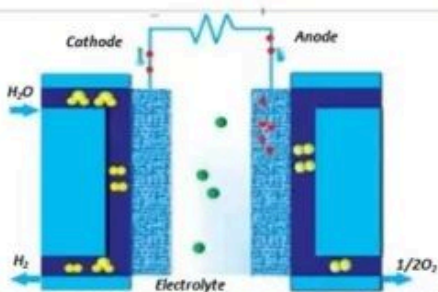


# 清华氢能电解水制氢系统研发与产业化

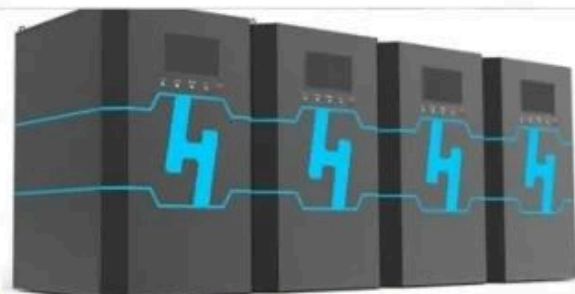
面向近中远期应用，已全面开展三种电解水制氢研发与产业化(AEC\PEMEC\SOEC)  
培育出思伟特和海德氢能两个制氢装备公司

## 固体氧化物电解 (SOEC)

处于研发与示范阶段

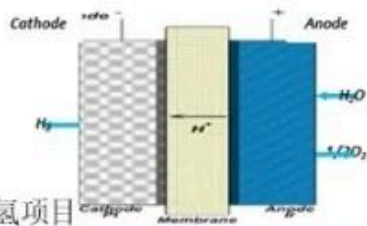


清华SOEC实验平台  
Tsinghua SOEC  
Platform



## 质子交换膜电解 (PEMEC)

正在与航天合作高压PEM制氢项目

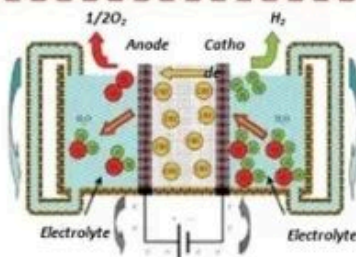


清华PEMEC实验平台  
Tsinghua PEMEC  
Platform



## 碱性电解 (AEC)

已经实现民用市场商业化



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

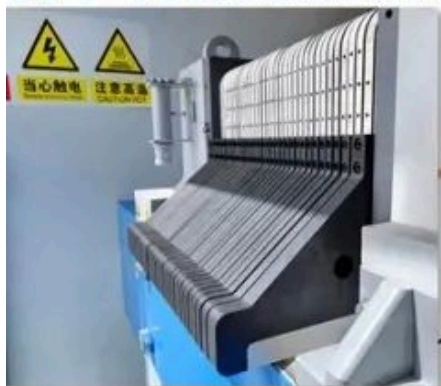






# 清华-海德氢能电解水制氢系统研发与产业化

## 清华-海德氢能氢舟产品：三大绿氢科技



安全  
海德氢  
安全科技



高效  
标准化  
插片式电堆



智能  
数字化云平台



氢舟™制氢系统搭载云帆®单片及电堆

首创标准化可拓展带压电解单片技术

首创插片式带压电堆技术

首创单片电压检测cvm融合状态预测技术

首创制氢系统在线软件升级OTA

首创制氢系统单片12小时内现场升级

首创制氢模块气体纯度实时检测与控制技术

首创无线智能氢泄漏传感技术

首创绿电制氢大系统控制方案

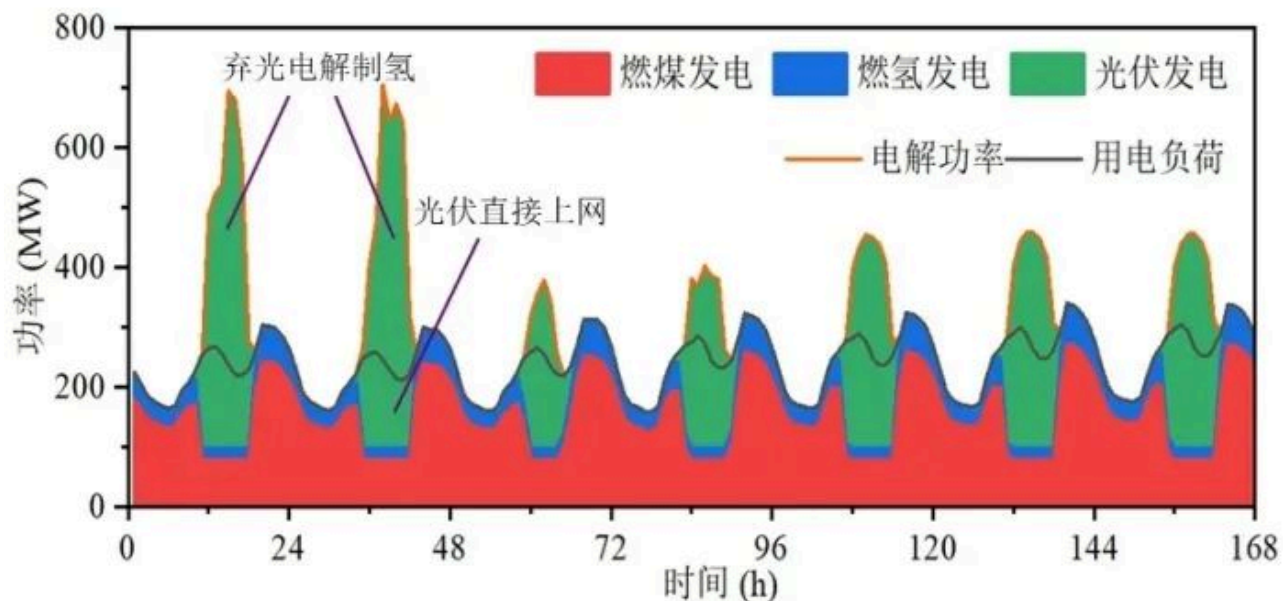




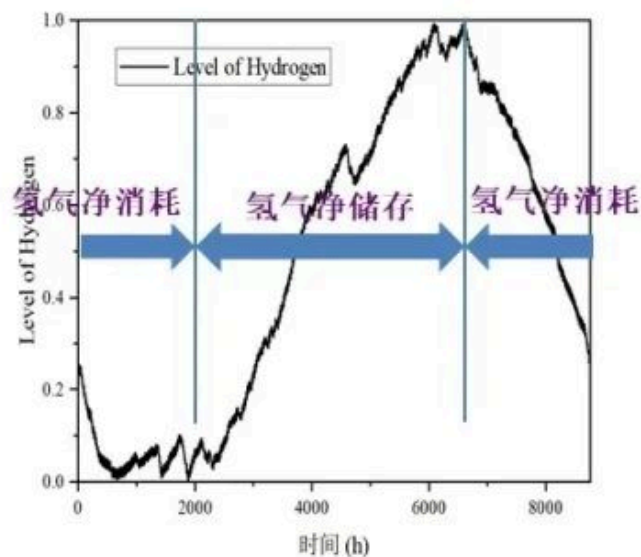
# 集中式氢储能示范工程可行性分析

## 集中式氢储能示范：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



# 清华团队分布式氢储能热电联供系统研发

## 分布式氢储能示范：光伏+制氢+燃料电池热电联供

### 海纳 SENSOR 2.0

- 体积小、重量轻、功耗低、安装方便、维护简单
- 支持多种通信协议，可接入现有监控系统
- 支持多种传感器接口，可扩展性强

### 规格

尺寸	100mm	100mm	100mm
重量	~10kg	~10kg	~10kg
工作电压	10V-24VDC	10V-24VDC	10V-24VDC
工作温度	-20°C	0°C	+55°C

### 云帆——标准制氢单元

- 模块化设计，易于安装和维护
- 支持多种制氢工艺，可根据需求定制
- 支持多种储氢方式，安全可靠



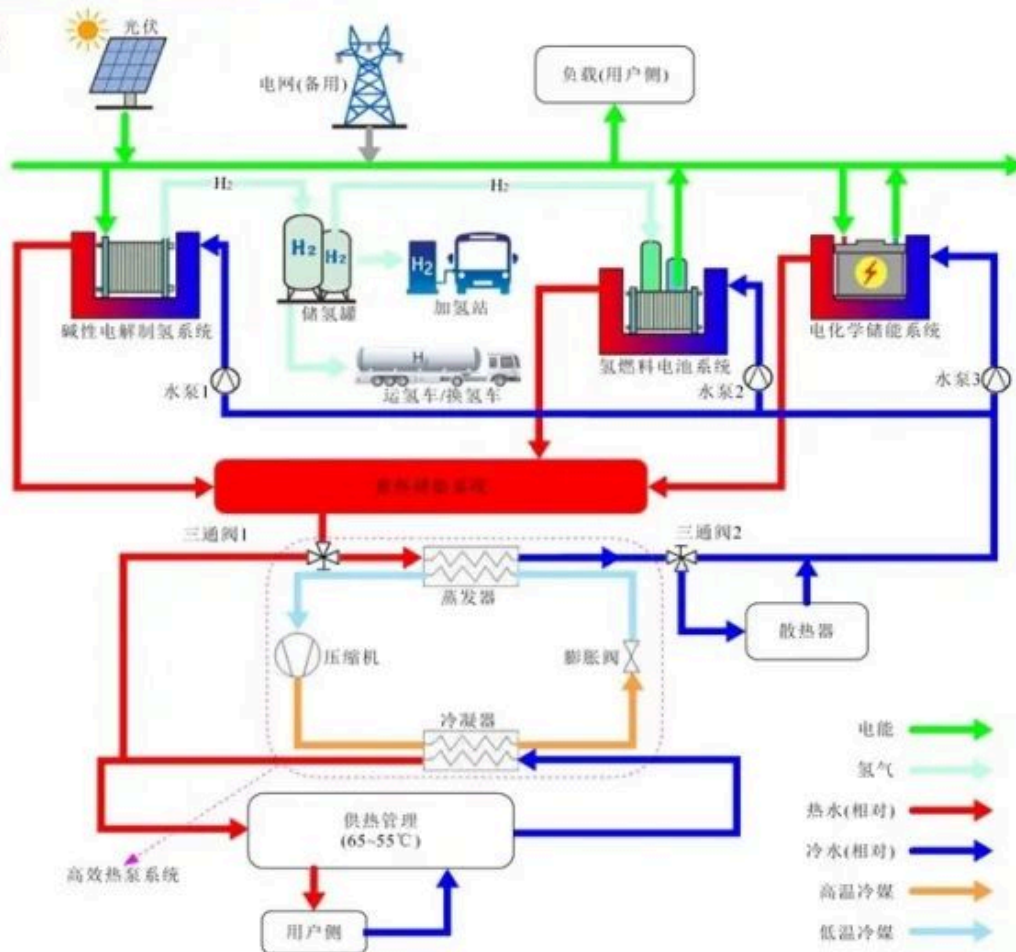
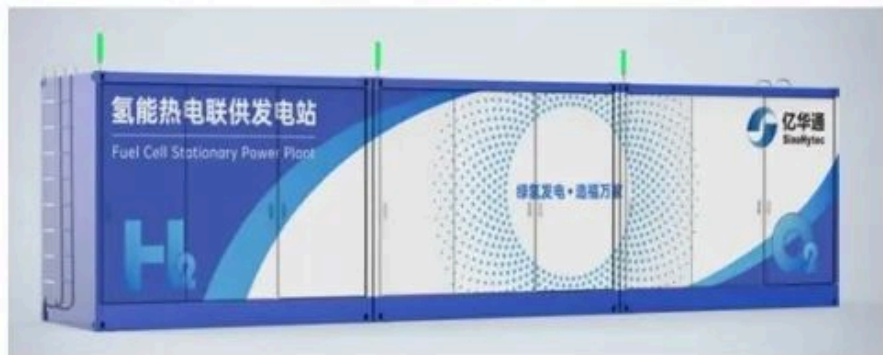
### 数字化云平台 COMPASS

- 实时监控、远程控制、故障诊断、数据分析
- 支持多种设备接入，兼容性强
- 支持多种通信协议，可接入现有监控系统



### 规格

	Modeler - 100C	Modeler - 200C
额定功率	100kW/1h	200kW/1h
最大产氢量	4.2Nm³/h	8.4Nm³/h
最大产热功率	5.0MW/h	10.0MW/h
效率	20-70%	20-70%
制氢成本	<1元/Nm³	<1元/Nm³
占地面积	~2.0m²	~4.0m²





# 柔性电力系统的全周期储能技术

## 内容提要

- ◆全周期储能的背景：双碳战略-储能需求-储能比较
- ◆长周期电制氢储能：燃料电池-电解制氢-绿氢储能
- ◆中周期电化学储能：被动安全-主动安全-本质安全
- ◆短周期电动车储能：智能动力-光储充换-车网互动



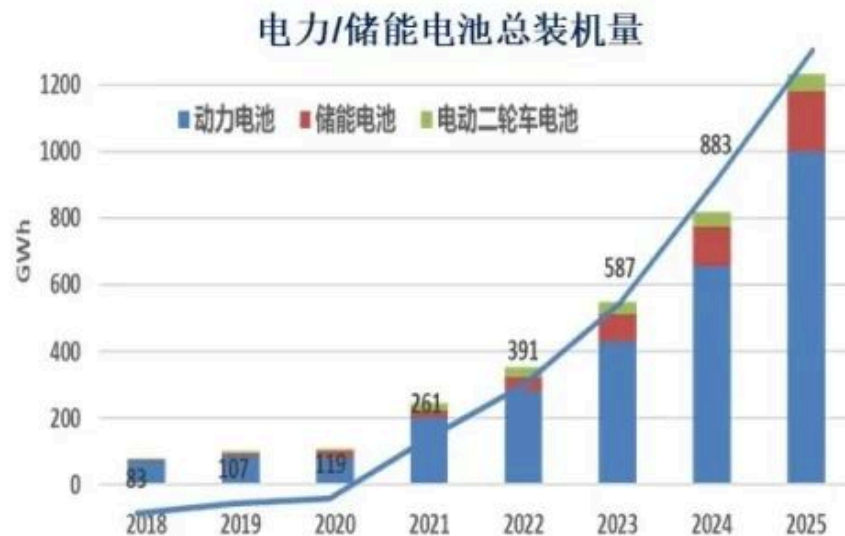


# 中周期动力电池电化学储能电站

- ◆ 截至2022年底，全国新型储能装机中，锂离子电池占比**94.5%**、压缩空气**2.0%**、液流电池**1.6%**、铅酸(炭)电池储能**1.7%**、其他技术路线**0.2%**。
- ◆ 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。



制图：中商情报网 (WWW.ASKCI)



数据来源：网络公开资料



# 清华大学电池安全实验室

清华电池安全实验室，由欧阳明高教授所创建。实验室共有教师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。电池安全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。



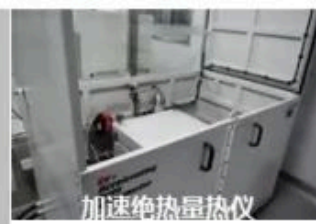
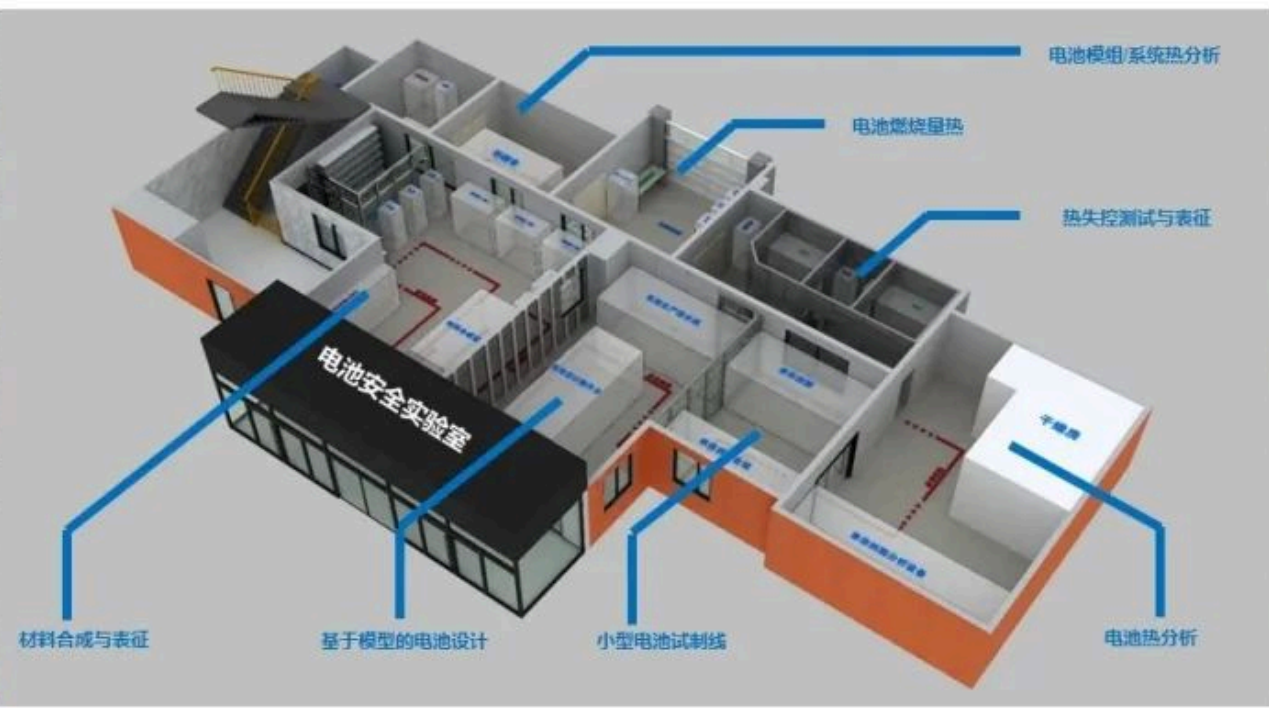
电池充放电测试仪  
200+通道



洁净干燥间



瞬态喷阀测试系统



加速绝热量热仪



差示扫描量热仪  
热重质谱联用量热仪



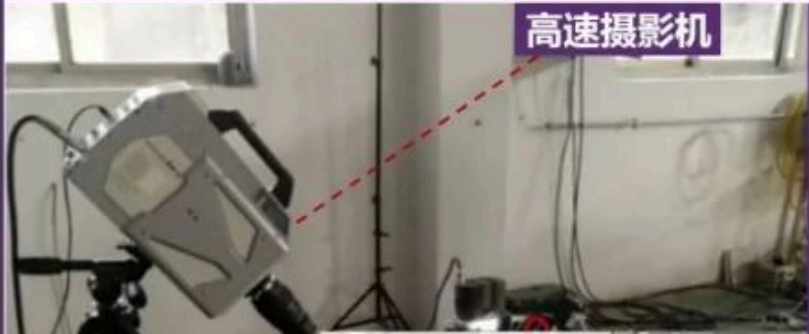
锥形火焰量热仪



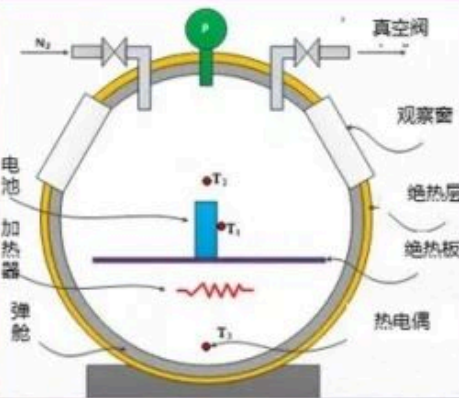


# 清华大学电池安全实验室

## 自主研发大容量动力电池热失控测试系统，已经推广到国内多家单位



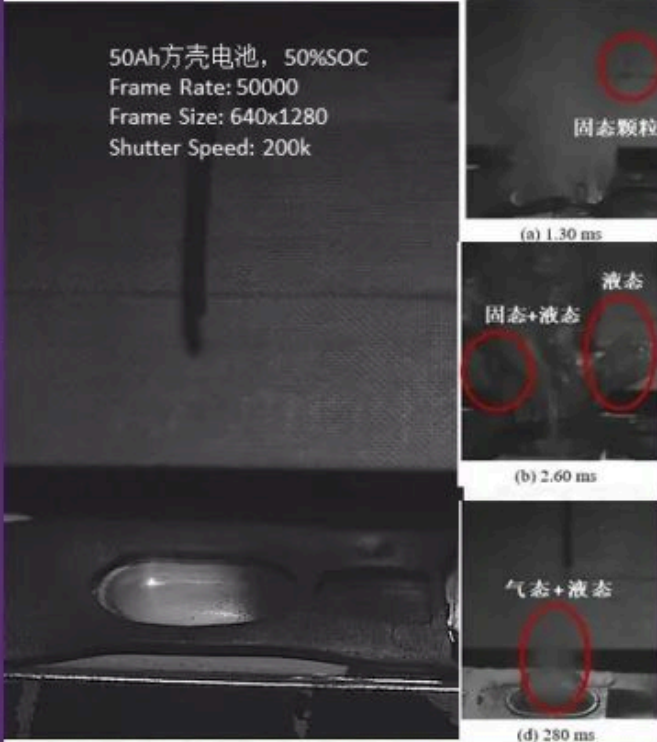
**高速摄影机**




真空阀  
观察窗  
绝热层  
绝热板  
热偶  
弹舱  
加热器  
电池  
N<sub>2</sub>


**电池热失控喷发过程高速(5万帧/秒)摄影**

50Ah方壳电池, 50%SOC  
Frame Rate: 50000  
Frame Size: 640x1280  
Shutter Speed: 200k



(a) 1.30 ms  
固态颗粒  
(b) 2.60 ms  
液态  
固态+液态  
(d) 280 ms  
气态+液态





**定容绝热燃烧仓**

专利: 2019106752550/201821203215.3, 201821201558.6/201821203257.7



# 清华大学电池安全实验室（宜宾基地一期已建成）



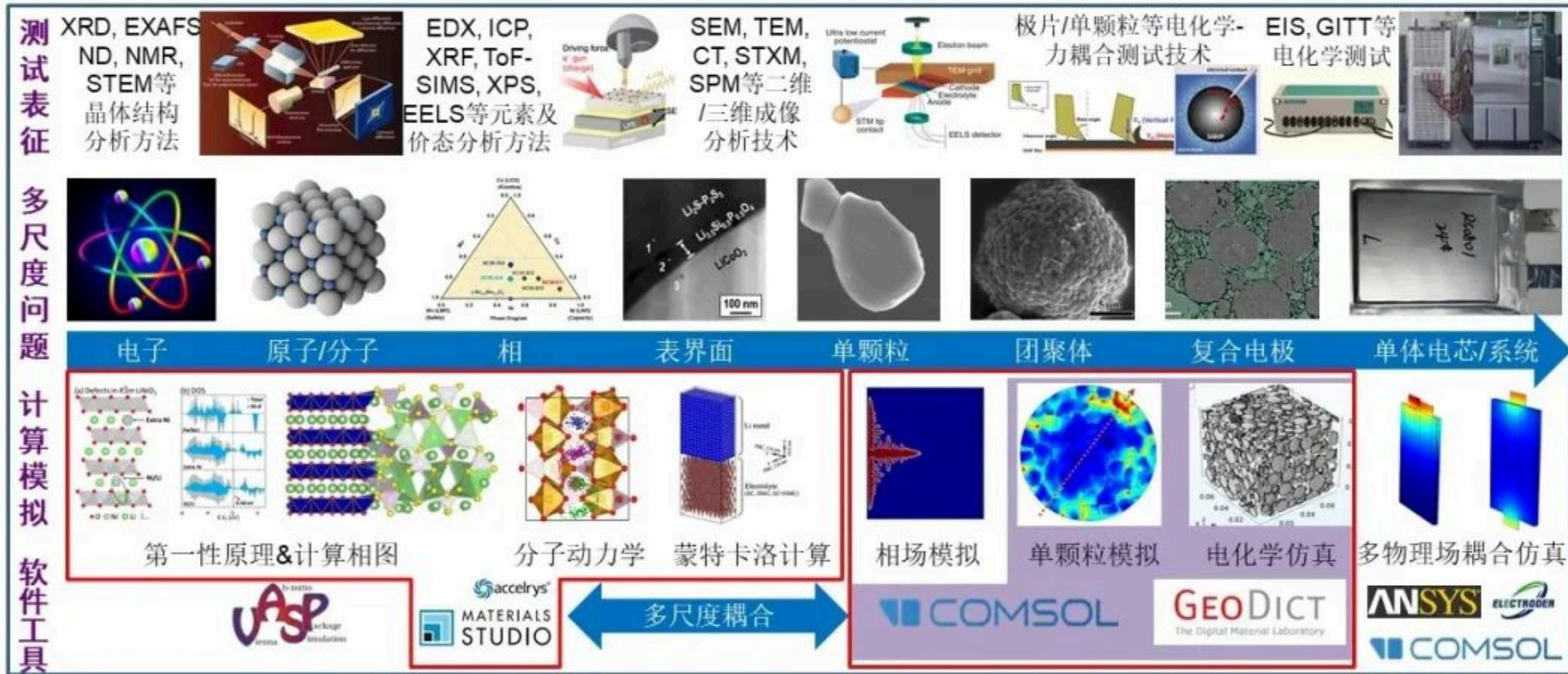
- 实验室面积约**4,000** m<sup>2</sup>
- 先进仪器设备**200**余台
- 一期工程总投资**1**亿元





# 清华大学电池安全实验室 (宜宾基地)

**多尺度集成计算与表征:**集成从微观到宏观的表征-计算-分析-设计-开发的**数字实验室**, 将最优的模拟仿真软件和测试分析手段组合起来, 引入人工智能与大数据技术, 形成新材料、新体系、新产品的测评、模拟与开发的闭环研究体系



# 清华大学电池安全实验室

- ◆ 2014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，研发合同超过1.1亿元；
- ◆ 2015年以来，孵化创业电池相关创业企业8家，知识产权转让价值4千万元；
- ◆ 2016年以来，成果获得推广应用，相关应用单位近三年累计新增销售额1042亿元，新增利润28亿元
- ◆ 2022年10月，**国家储能电站安全监控平台专家委员会主任单位，国家市场监管总局动力与储能电池安全重点实验室；**

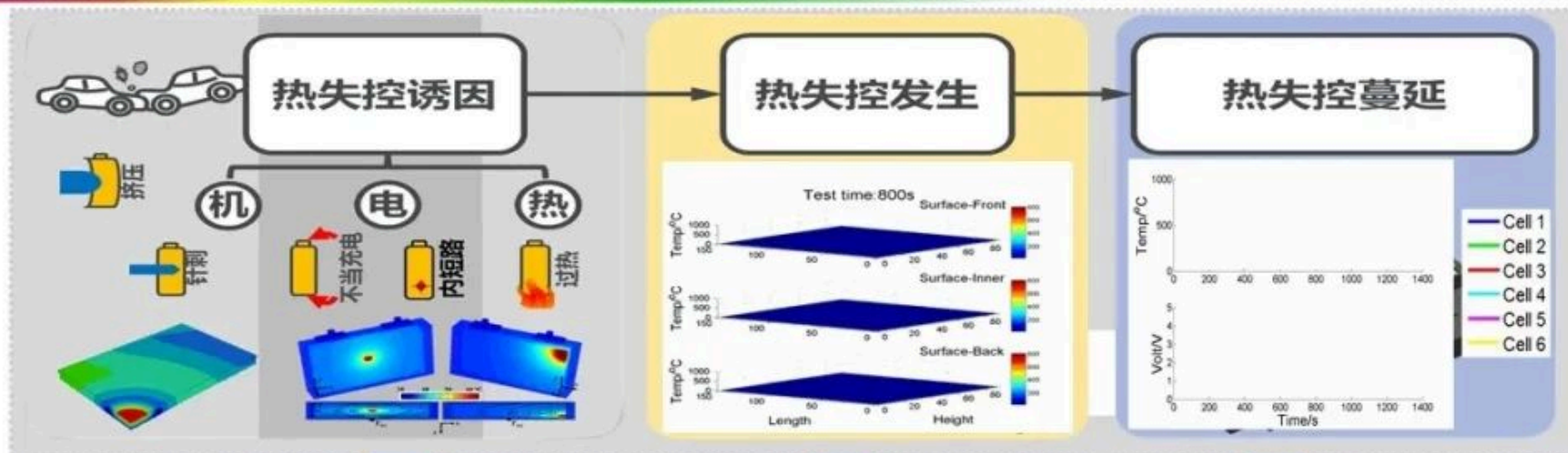




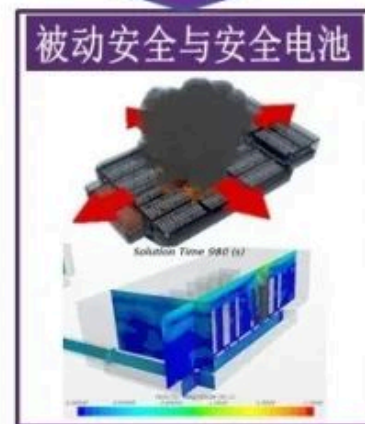
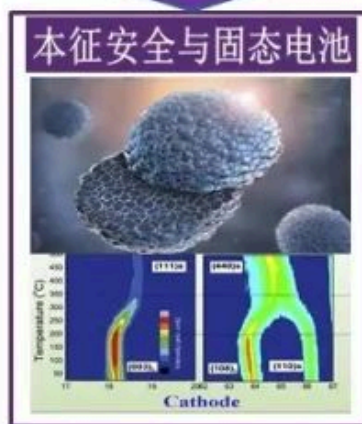
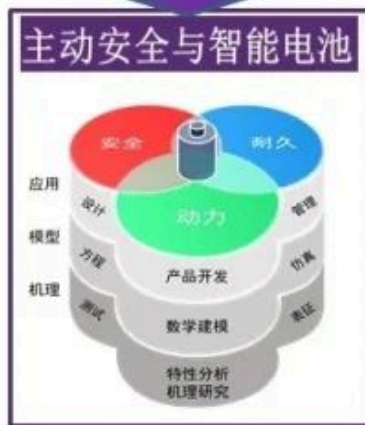


# 清华大学电池安全实验室

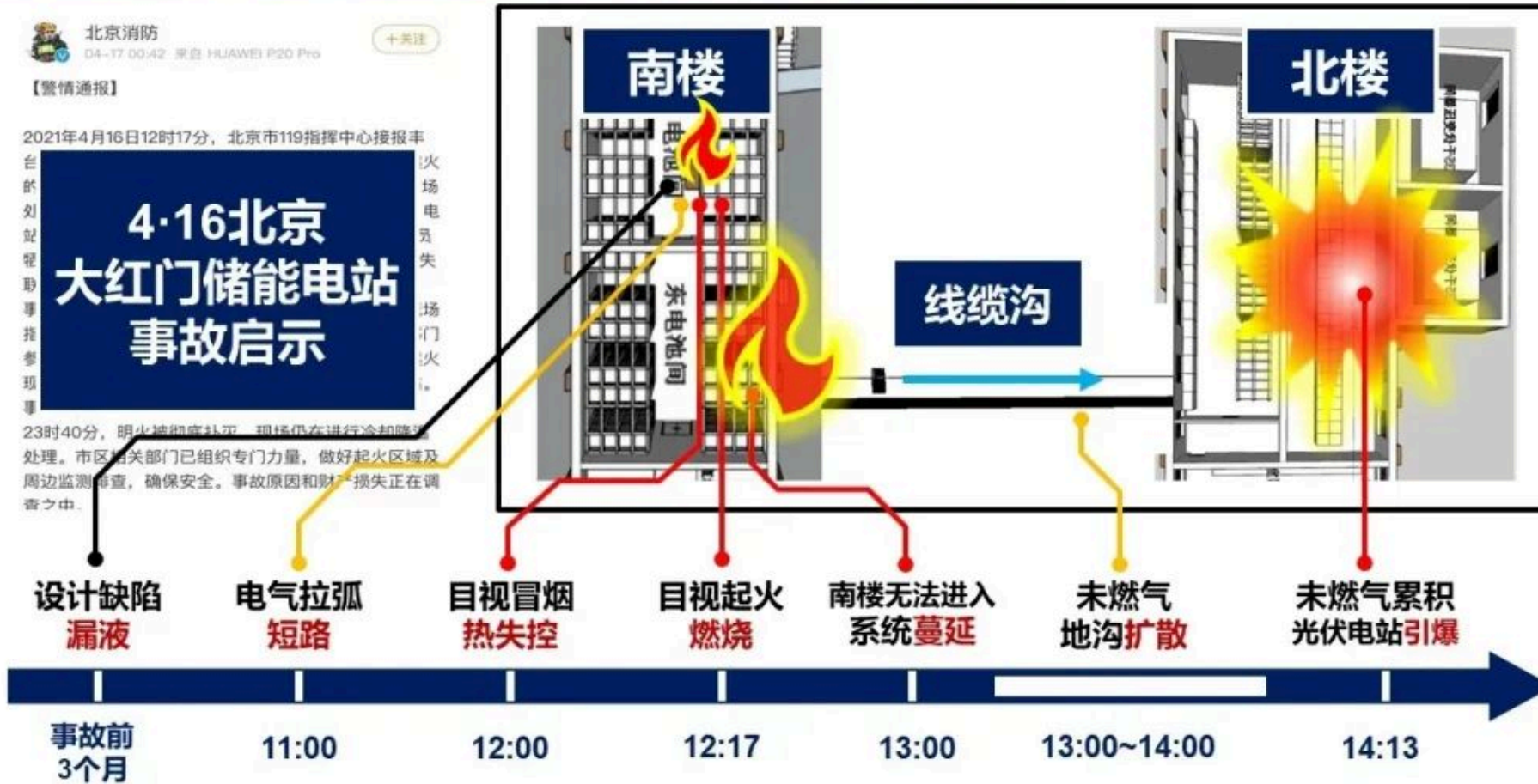
电池热失控过程



电池安全技术



# 电化学储能电站热失控诱发、蔓延与致灾机理与防控



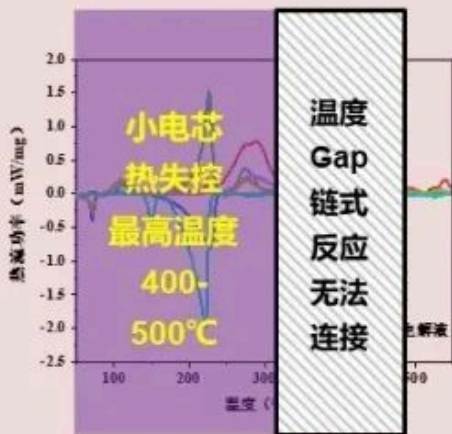


# 磷酸铁锂电池热失控机理

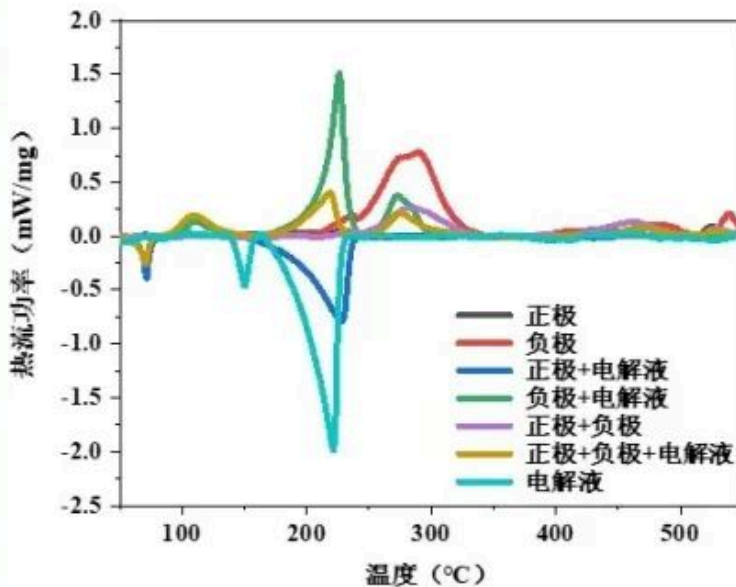


### 小尺寸电池

- ◆ 本征时序决定最高温度
- ◆ 正负极反应分开

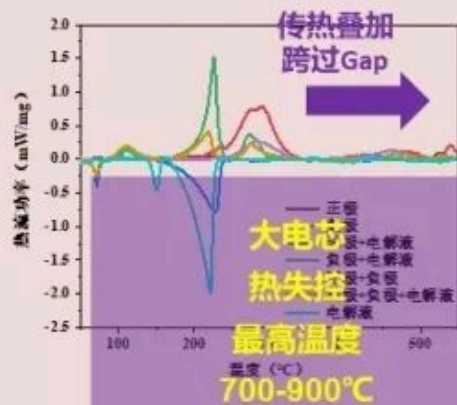


### 磷酸铁锂电池热失效时序



### 大尺寸电池

- ◆ 传热效应叠加提高温度
- ◆ 正极释氧分解参与反应



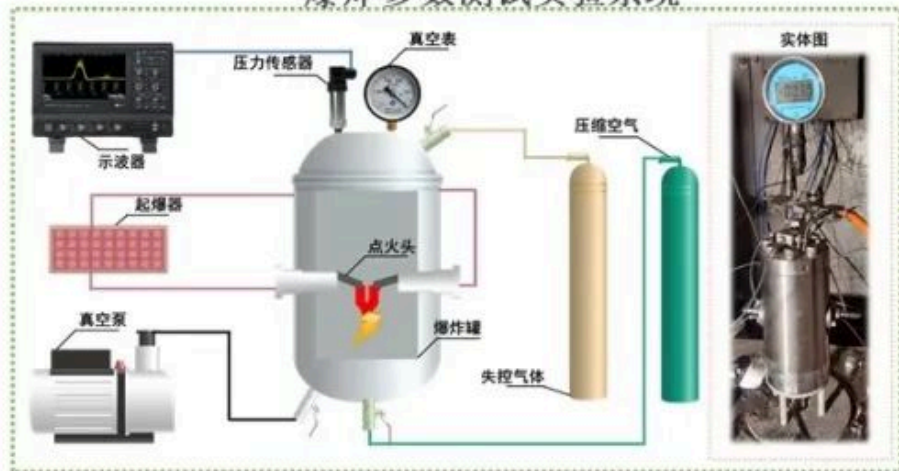




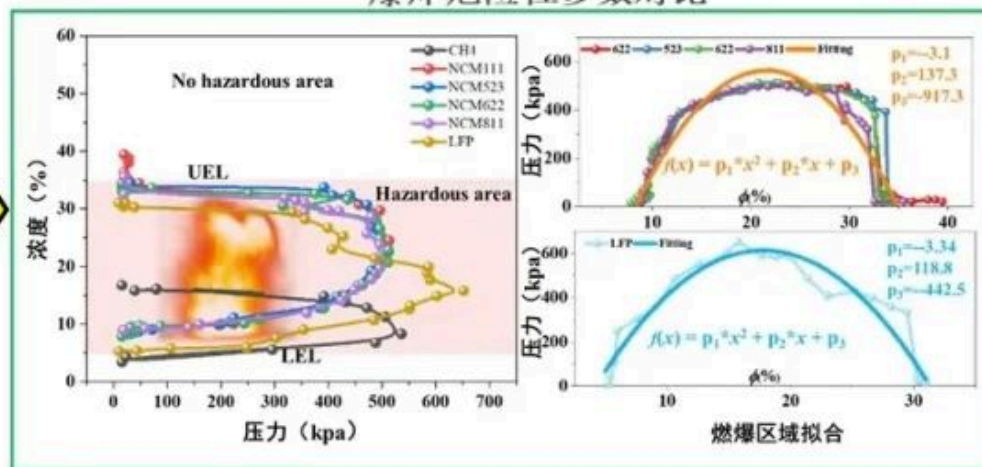
# 电池喷发与热失控蔓延机理

## LFP和NCM锂离子电池热产气燃爆危害性比较

爆炸参数测试实验系统



爆炸危险性参数对比

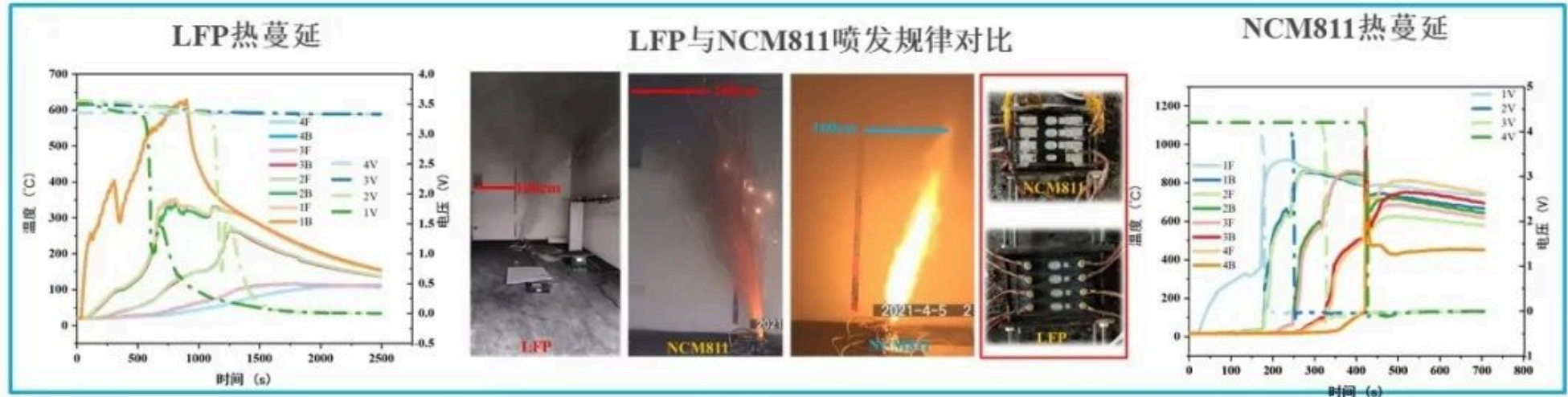


- 计算的得到5种电池失控产气的爆炸指数分别为：LFP=4.18Mpa·m·s-1、NCM111= 2.0Mpa·m·s-1、NCM523=2.04Mpa·m·s-1、NCM622=1.67Mpa·m·s-1、NCM811=1.75Mpa·m·s-1。
- LFP电池失控产气的爆炸指数约为NCM电池的2倍。**



# 电池喷发与热失控蔓延机理

## 热蔓延特性-NCM电池和LFP电池热失控蔓延规律对比

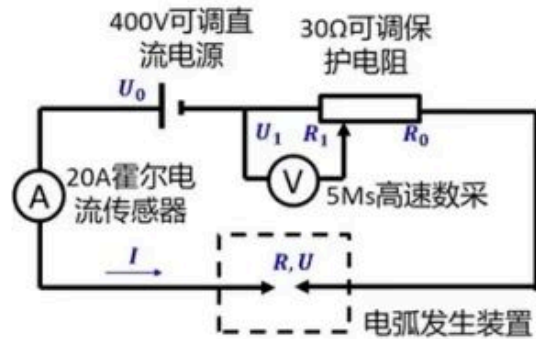


- LFP电池模组中触发电池释放的能量不能成功触发热失控蔓延，NCM811则较容易触发热失控蔓延，出现多次射流火，高温颗粒物喷射高度超过240cm。
- **LFP电池模组只有在有明火时，才能发生触发热蔓延。**



# 电池喷发与热失控蔓延机理

高压系统电弧测试与防护：设计高压电池系统中的电弧模拟实验台架并开展测试



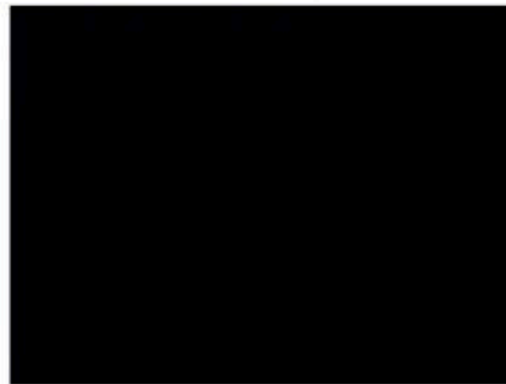
水下电弧燃烧模拟



电弧烟气点燃



电弧测试系统



箱体内热失控电弧模拟




高温颗粒物导电测试



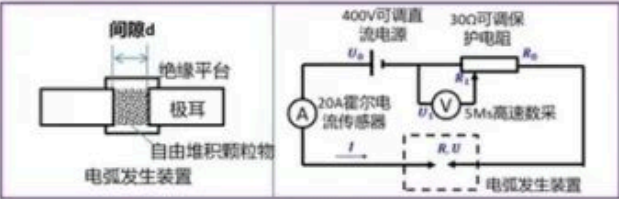
# 电池喷发与热失控蔓延机理

高压系统电弧测试与防护：“颗粒物诱导击穿电弧”使得某些原本良好的电气绝缘条件变得不安全

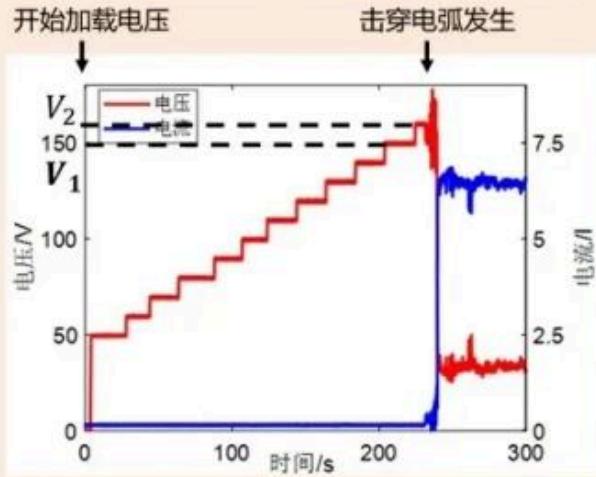
### 测试系统与方法



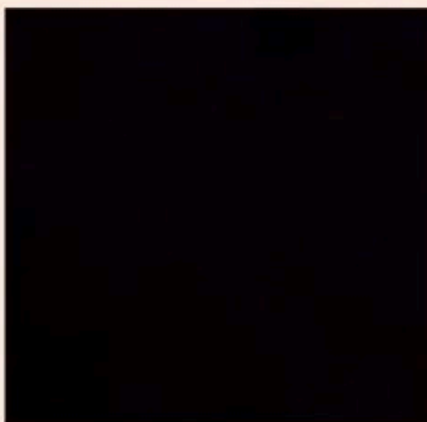
↓ 颗粒物作为电极间介质



### 测试过程与现象：存在临界击穿电压 $V_c$



**临界击穿电压测试过程**



电池热失控颗粒物填充电极间隙，充当“催化剂”，大幅降低所需击穿电压值

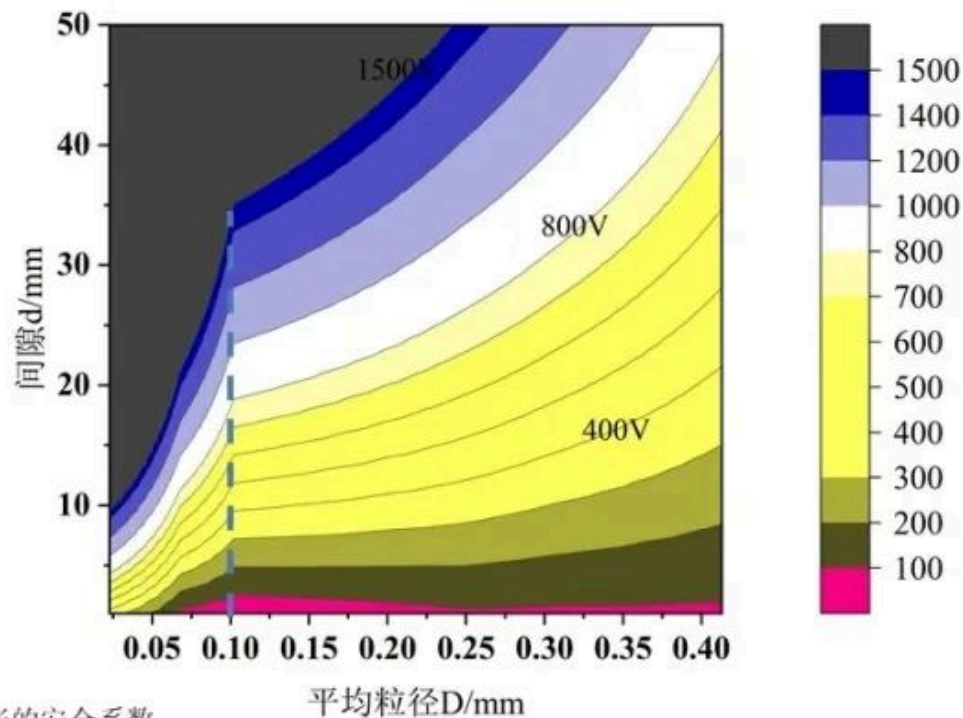
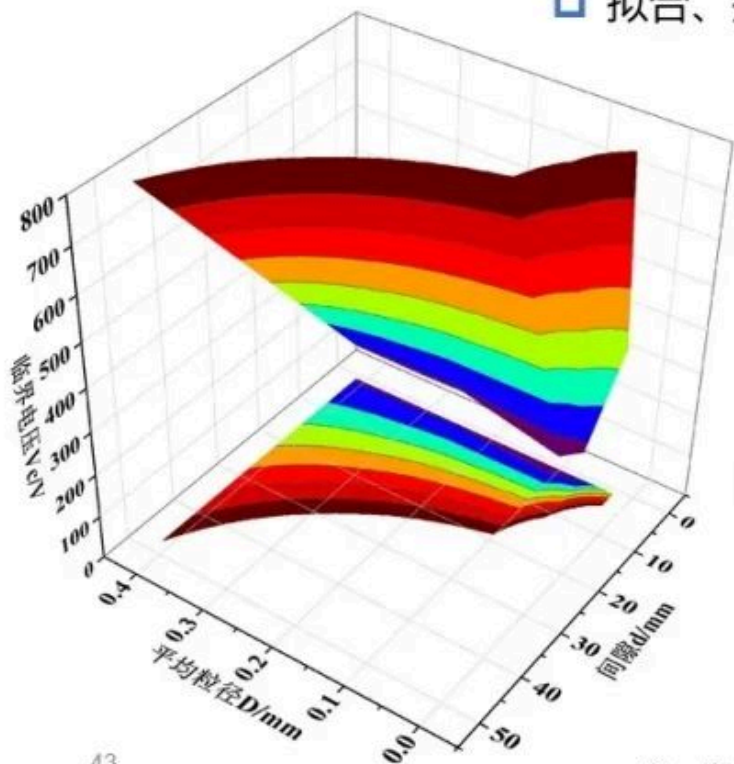
增大极间电压，产生击穿电弧（空气介质情形 $>400V$ ）  
 $\sim 30kV/cm$ （空气介质）  $\rightarrow$   $0.3\sim 0.9kV/cm$ （颗粒物-空气混合介质）



# 电池喷发与热失控蔓延机理

## 高压系统电弧测试与防护：颗粒物诱导电弧防护设计Map图

□ 拟合、插值获得临界击穿电压的等高线。



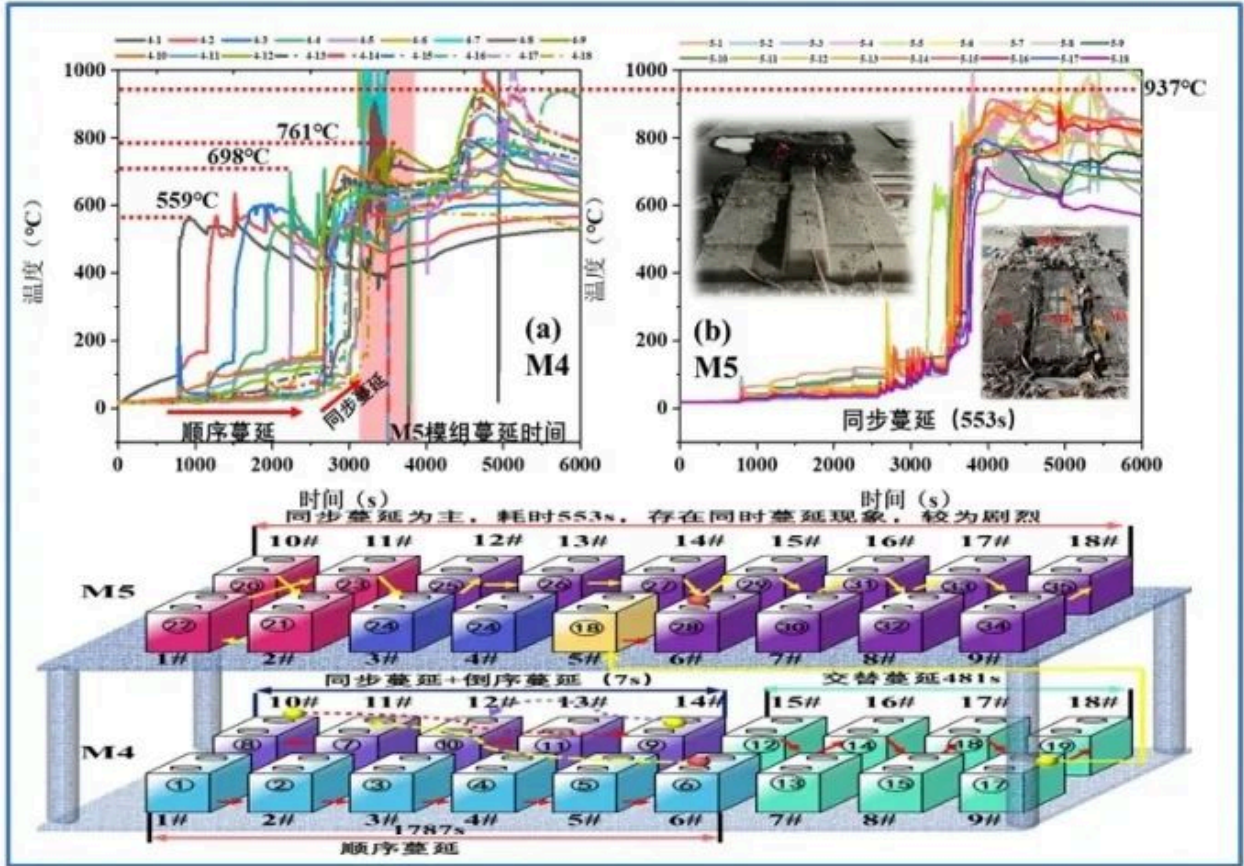
注：均未考虑实际情形的安全系数





# 电池喷发与热失控蔓延机理

## 储能电池系统热蔓延测试

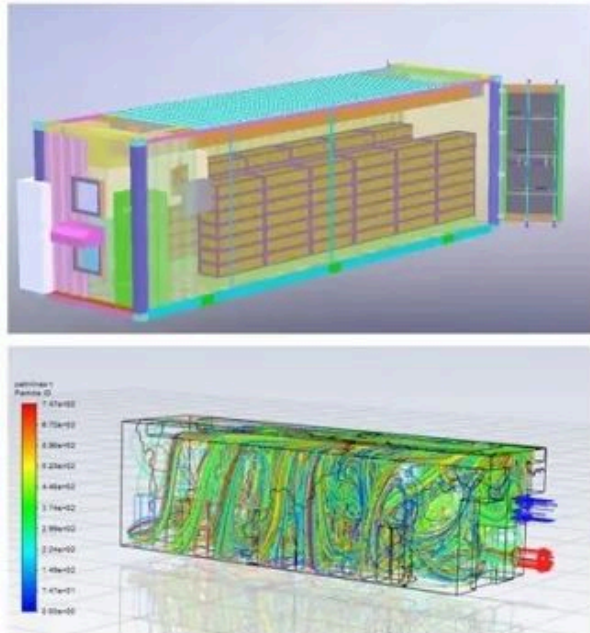




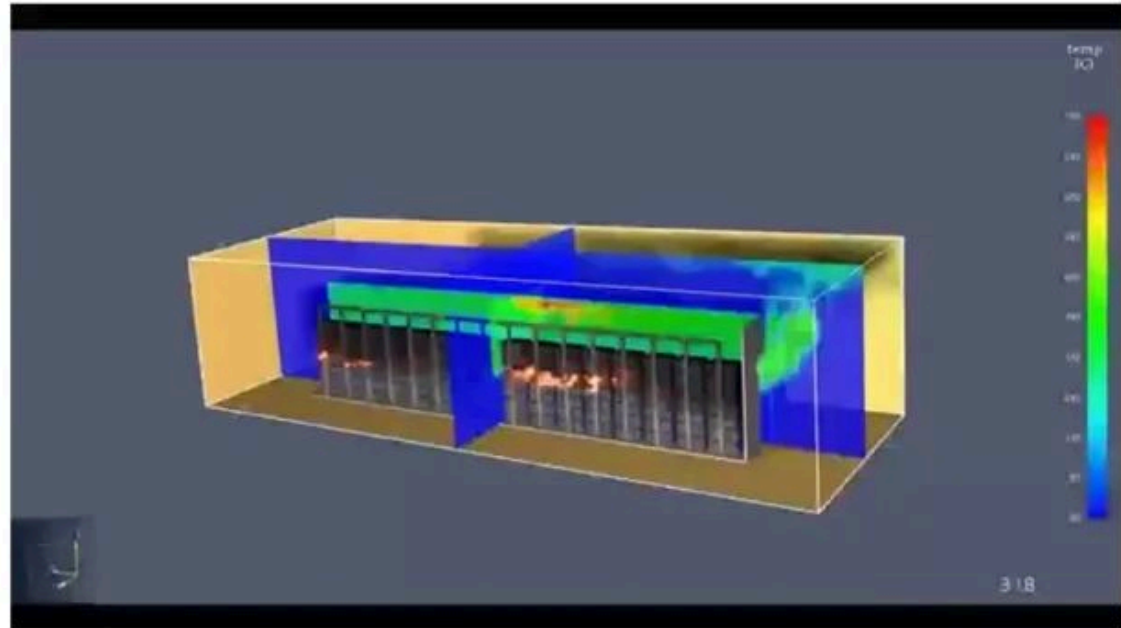


# 电池储能系统先进热管理设计

- 针对大型储能电池系统，建立电池系统热管理、热安全灭火的数值模拟方法。



MWh级预制舱式储能系统  
电池热管理仿真模型

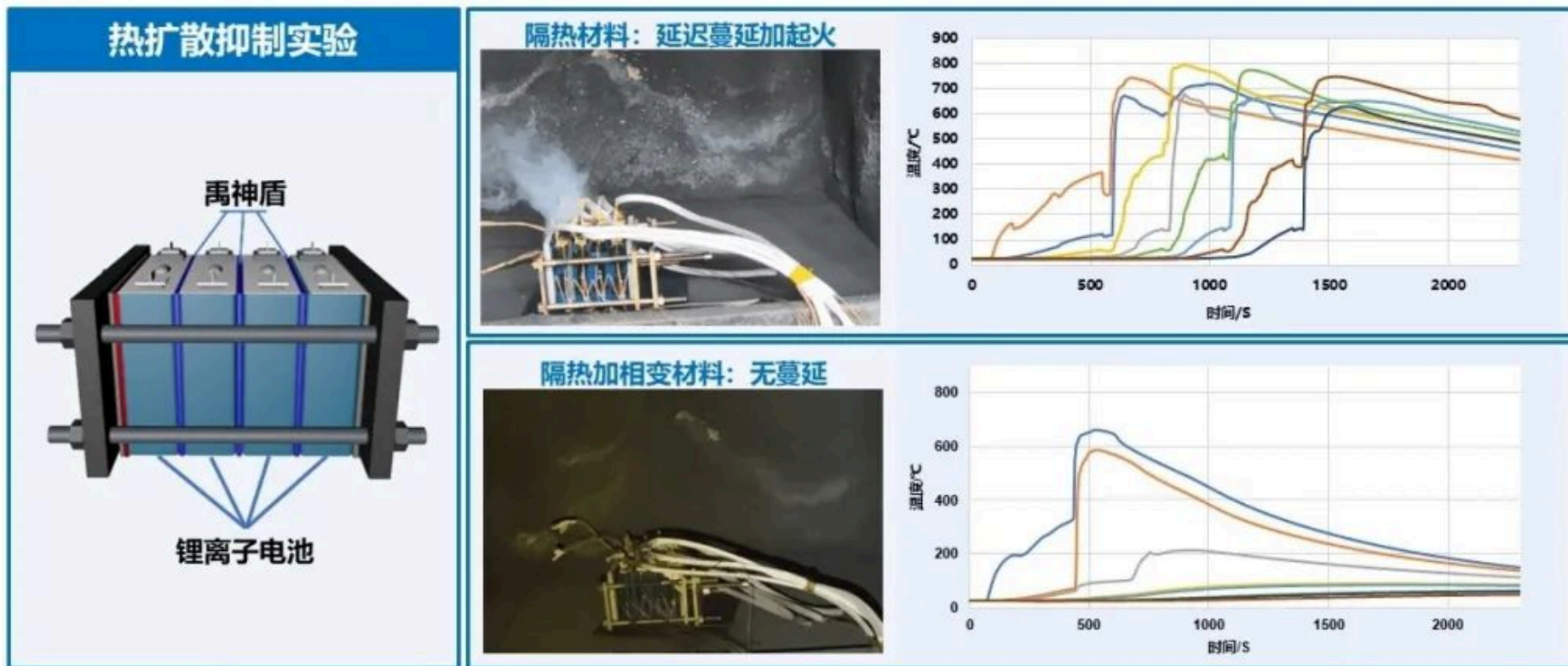


MWh级预制舱式储能系统  
电池燃烧灭火数值模拟



# 安全电池系统开发：清安科技防火墙-禹神盾产业化

- 单纯的隔热已经不能满足高镍三元高比能量电池模组的热扩散抑制需求，需要结合PCM相变材料进行“隔热+降温”的能流疏导。



# 安全电池系统开发——清安储能电化学储能电站产业化



## 重庆清安储能科技公司储能产品

### 核心部件

#### 电池PACK

电芯级热失控探测与防护  
高能量密度成组方案  
一体化高效均温散热设计

#### 电池管理系统

全生命周期高精度SOX算法  
自适应高效均衡技术

#### 能量管理系统

车规级控制器      5S系统融合  
云边缘联合控制      分布式主机竞争架构

#### 辅助系统

全系统、全场景、全流程仿真  
精细化运行环境控制  
全面直流电气安全防护技术  
高可靠火情探测与灭火防爆技术

### 系统集成

#### 集装箱式储能系统

#### 分布式储能系统

##### 低压系列 (400V)

容量范围覆盖0.2~2.45MWh

风冷系列



##### 高压系列 (10kV/35kV)

针对大工业企业客户设计

容量范围覆盖2.15~5MWh

风冷系列

液冷系列



### 云平台及服务

#### 储能云平台 (Web/APP)

顶级团队打造业界领先的平台架构  
基于数字孪生的远程监测及精准运维  
容器化部署, 开放兼容, 超强扩展能力

#### 项目施工交付

方案设计 — 销售设备 — 建设交付  
国内外近1GWh储能项目成功交付经验

#### 智能运维

全天候实时监测      海量运行数据分析  
毫秒级告警上推      多场景运行模型  
支持OTA升级      电站运营策略优化

#### 数字能源服务

能源互联网      多能互补  
智能削峰      混合供电





# 柔性电力系统的全周期储能技术

## 内容提要

- ◆全周期储能的背景：双碳战略-储能需求-储能比较
- ◆长周期电制氢储能：燃料电池-电解制氢-绿氢储能
- ◆中周期电化学储能：被动安全-主动安全-本质安全
- ◆短周期电动车储能：智能动力-光储充换-车网互动



# 短周期基于车网互动的电动汽车储能

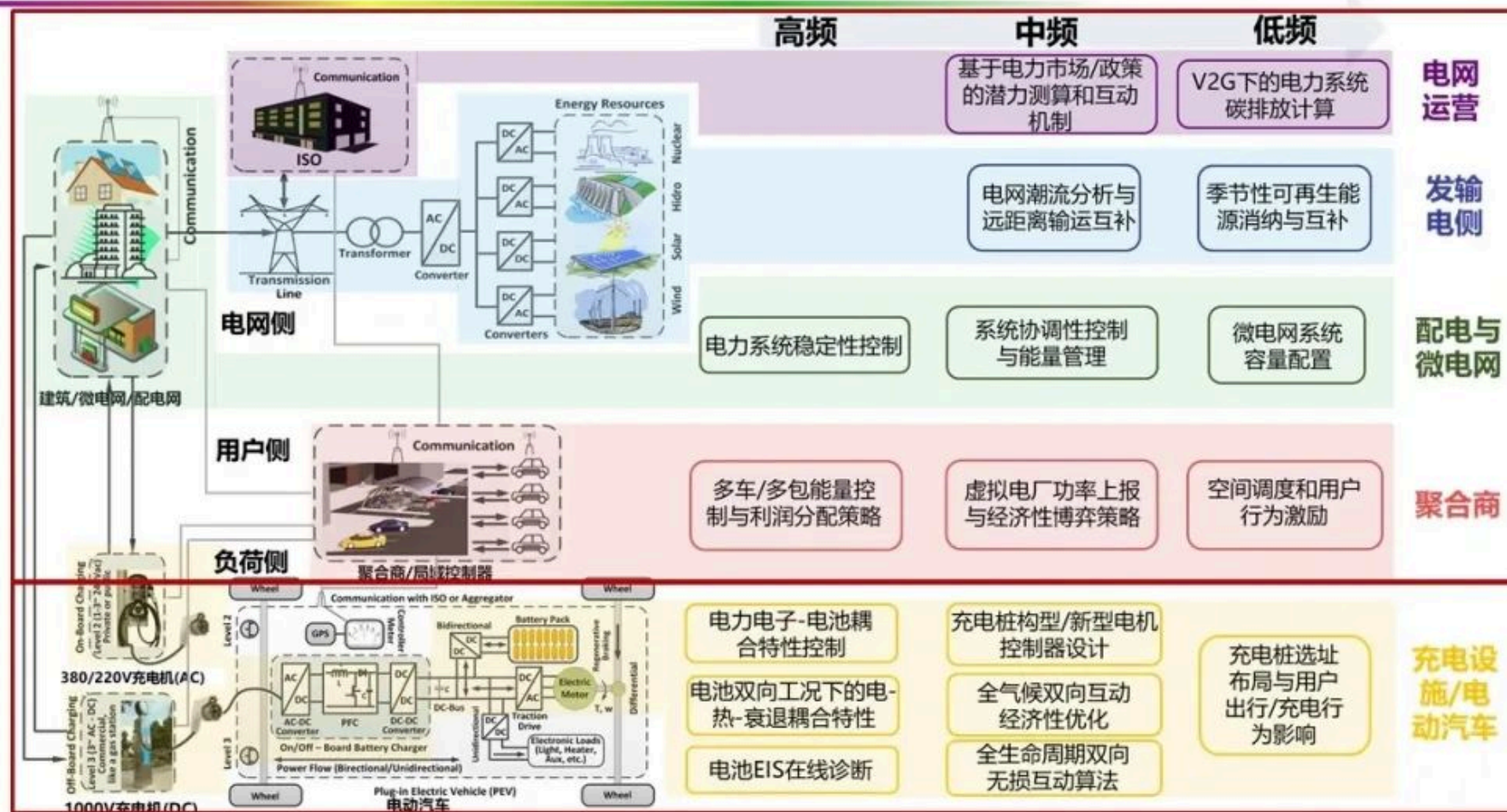
## 集中式储能电站与分布式电池储能比较

- 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





# 清华大学《新能源动力系统》科研团队车能路云智慧能源研发







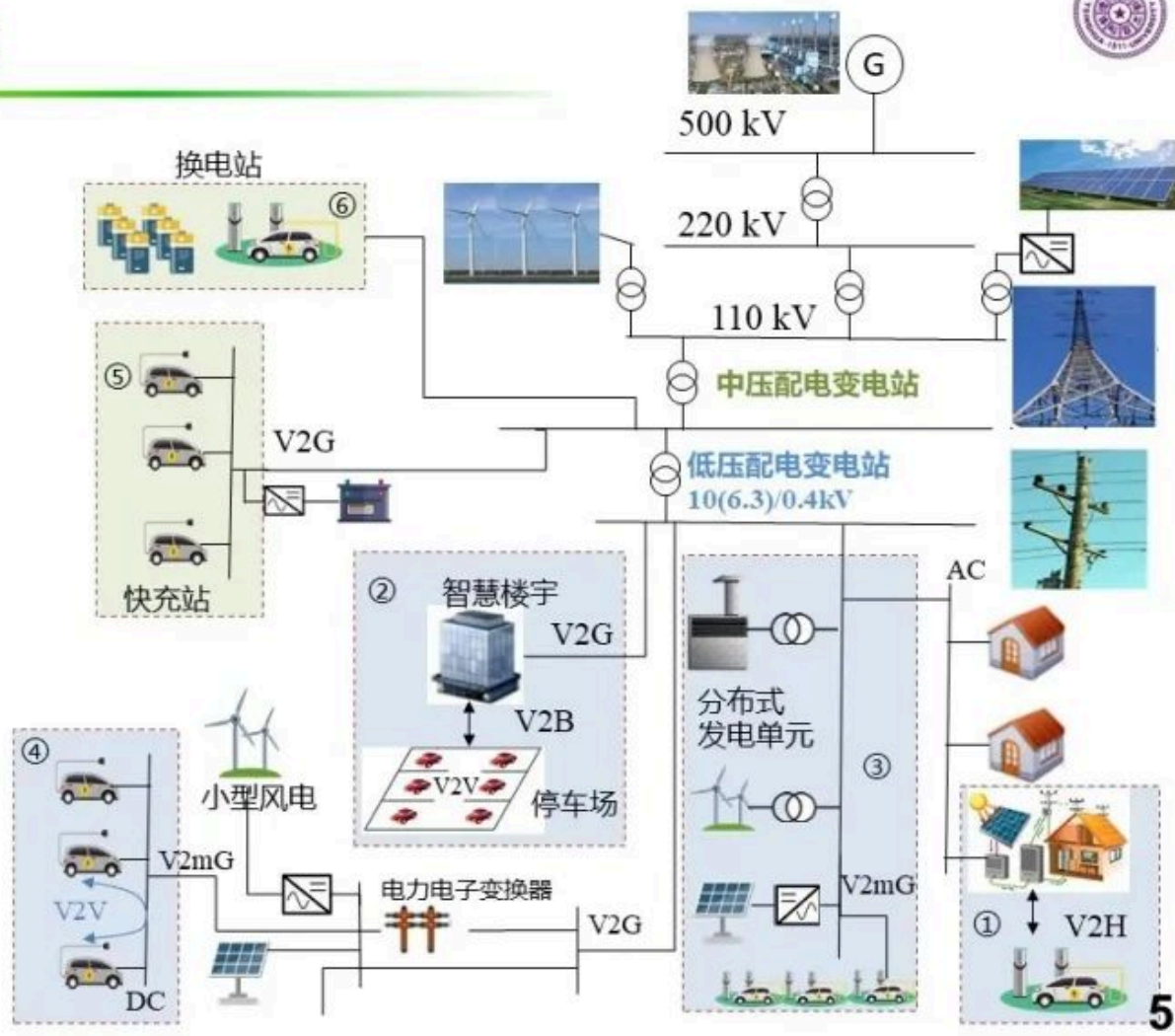
# 智慧能源与车网互动技术

## 面向建筑、园区、交通的智慧能源系统

- 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

- ◆ **电网接口:** 城市低压配网 (居民区等) 和中压配网 (高速路等)
- ◆ **聚合方式:** 多个居民区、多个楼宇、多个场站、多个充电桩等都可聚合成虚拟电厂





# 智慧能源与车网互动技术

## 车网互动软件平台技术

**车辆出行预测引导(与自动驾驶相结合)**

**负荷监测预测平台:**

设备的状态监测预测与安全预警

传感数据融合 AI  
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

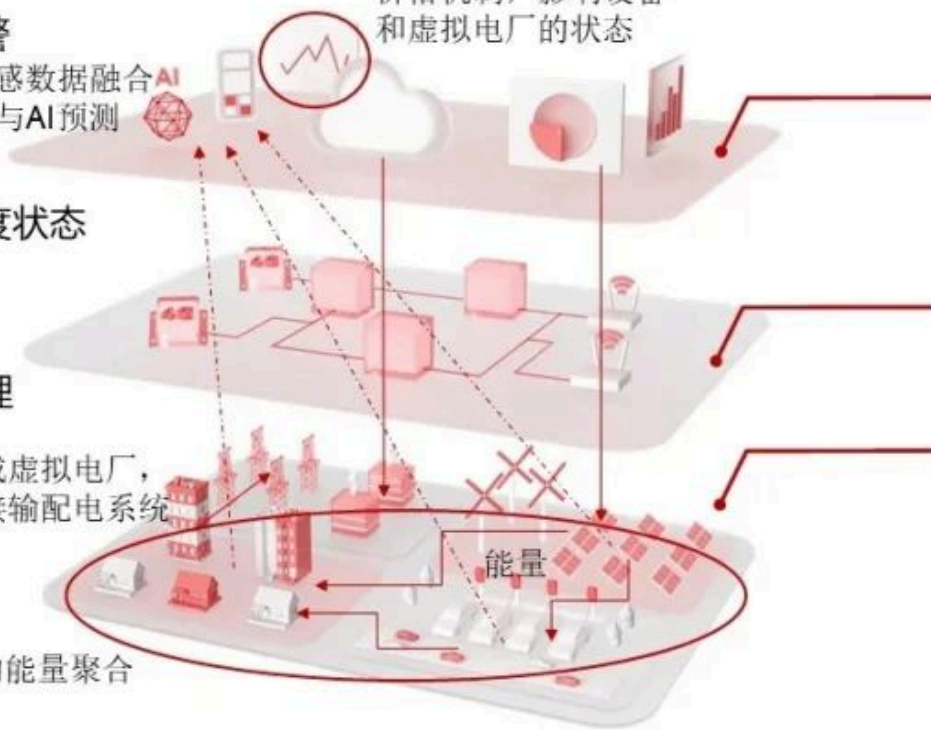
形成虚拟电厂,  
连接输配电系统

**能量管理平台:**

设备间的能量流动管理

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

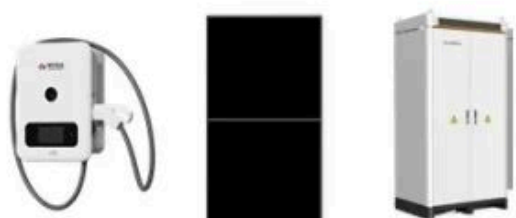
光伏、风电、储能、电动汽车、建筑负荷等能源终端

# 清华-链宇科技车网互动技术：V2H



## ◆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V2H充电桩、  
光伏组件和分布式安全储能产品



7kW V2H桩    屋顶光伏    分布式储能

设备层

能源路由器：微网系统的智慧能源大脑  
智能充电控制器：充电功率有序可控  
智能插座：主动控制可调负荷



能源路由器    智能充电控制器    智能插座

控制层

零C云智慧能源平台：状态监测 & 协同控制  
零C云充小程序：立即充 & 有序充 & V2G服务



零C云智慧能源平台    零C云充小程序

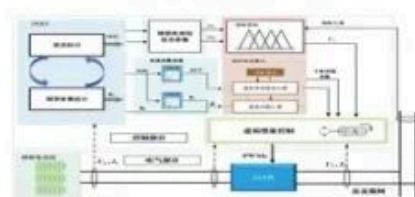
管理层

双向电力电子器件开发



车载双向充电机    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





# 清华-链宇科技车网互动技术：V2B、V2mG

◆以多层次硬件安全和软件监控技术为核心，构建面向园区的智慧能源V2X系统



高安全储能预制舱系统

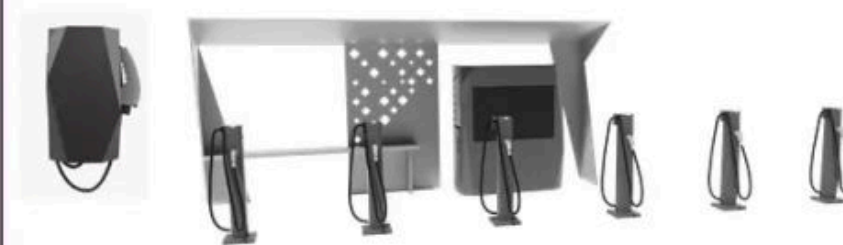


高安全储能+电动汽车充电集成系统



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  
实时掌控终端分布情况  
智慧能源平台与安全监控

各类应用场景  
进行精细化能源管控



有序充电与双向充电系统

光伏、储能、充电、V2G充放电、电动汽车体检、能量路由、EMS能量管理、智能调控平台，为工业园区、建筑楼宇等提供一站式解决方案。

# 清华-链宇科技车网互动技术：车网互动项目落地

## 光伏+储能+车网互动+智慧能源平台一体化解决方案

### @天津：零碳V2G场站示范打造

#### 新一代低碳场站智慧能源管理解决方案



##### AI优化降本增效

融入车网互动，投资成本降低6%  
7年IRR由5.84%提升至9.11%

##### 全周期多能协调

多能互补智能管控，实现“车主-场站-电网”多边收益最大化

### @义乌：智慧低工业碳园区V2mG项目

#### 示范性低碳建筑园区智慧能源管理解决方案



##### 绿电消纳

光伏+储能+V2G，多能互补  
促进绿电消纳、降低增容费用

##### 能耗精细化管理

园区能耗精细化管理  
能量协调控制与智能源荷预测

### @佛山：爱旭光储充放一体化光伏工厂

#### 行业微网群去中心化绿电交易示范项目



##### 辅助服务

全周期碳核算，参与广东省辅助  
电网服务与绿电交易

##### 能效优化

可视化用能动态感知，数据挖  
掘分析与多维立体展示

### @深圳：首个规模化电动汽车V2G示范

#### @福田供电局，大规模车辆入网、绿色交通先行示范项目



##### 光储充放直流微网

240kW共直流母线V2G桩  
光伏+储能+V2G+直流负荷

##### 规模化V2G运营

15台15kW的V2G桩  
车网互动规模化经济性验证

### @深圳：深圳高技术创新中心V2B项目

#### 可调负荷接入虚拟电厂，收益约3.5元/度电



##### 建筑柔性扩容

有序充电+V2G、楼宇节能、  
柔性扩容、辅助电网服务

##### 电力市场交易

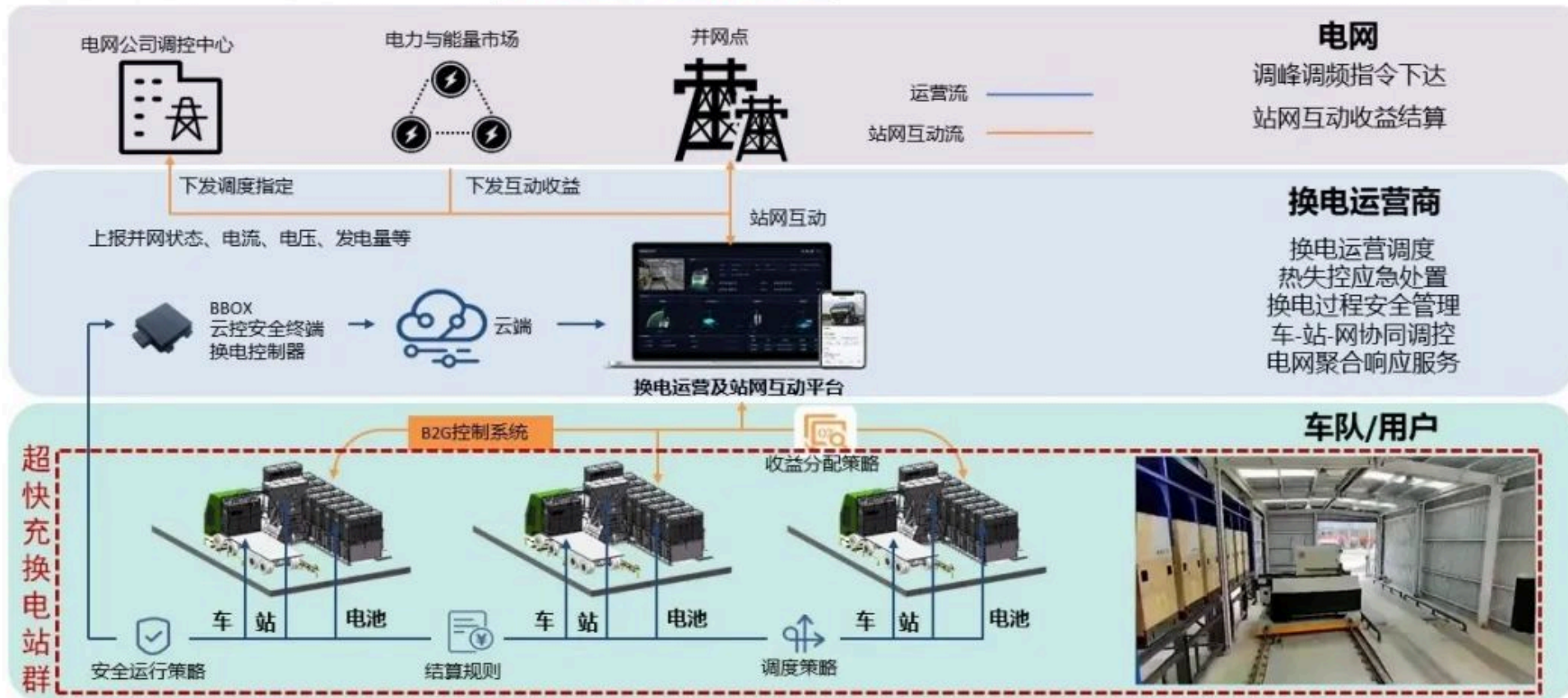
接入VPP聚合平台，接受电  
力交易中心调度指令，参与  
需求响应





# 清华面向高速公路场景的电动汽车智慧能源系统研发与示范

## 卡车换电站站网互动平台 (每座可以储电约1万度电)

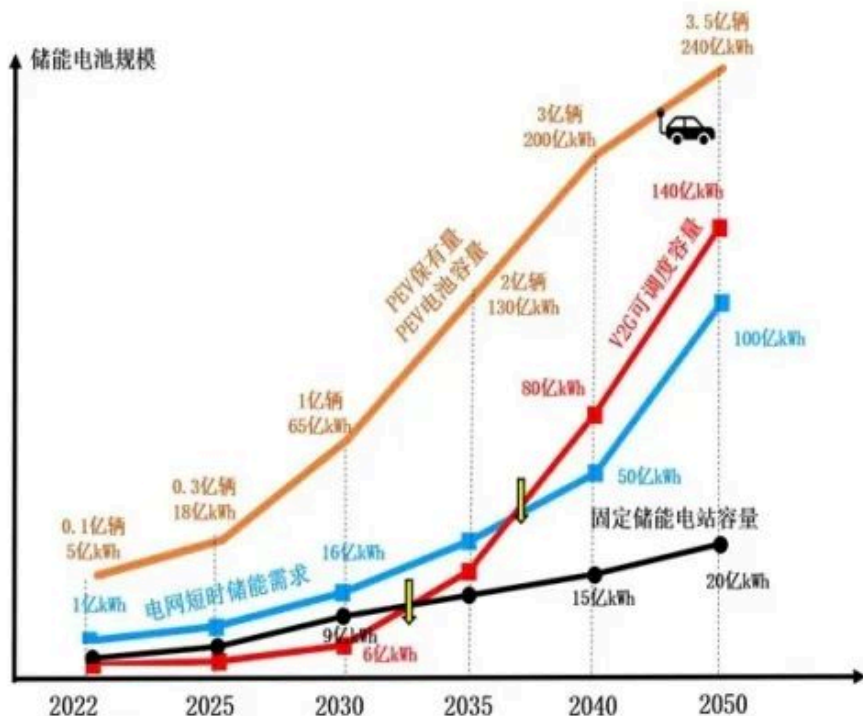




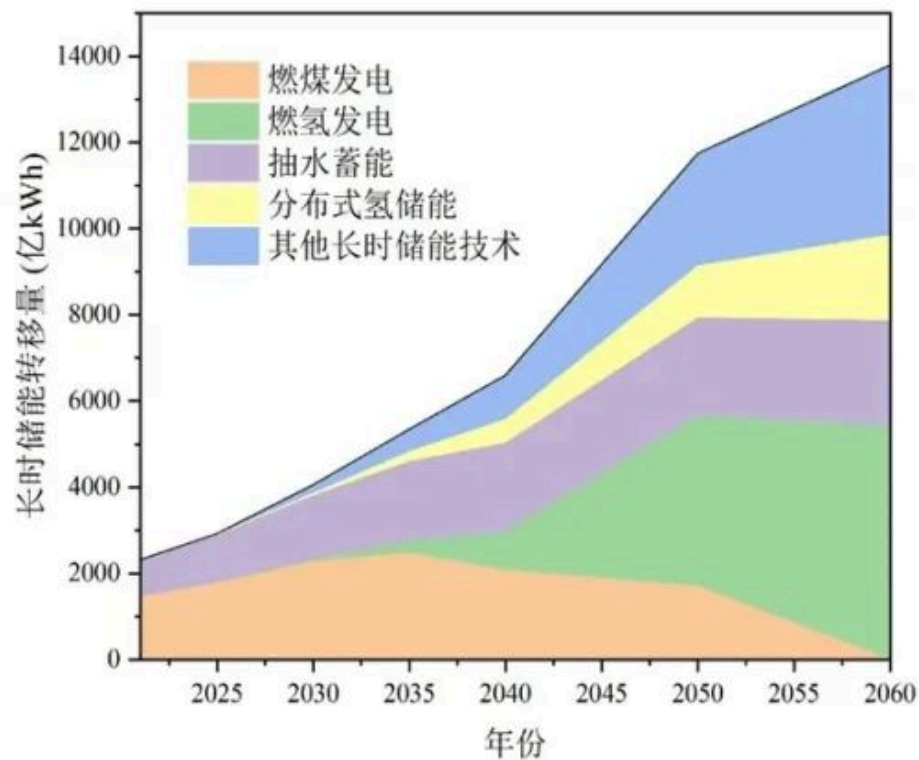


# 展望：中国柔性电力系统的全周期新型储能技术前景

## 中短周期储能



## 中长周期储能



# 让我们共同迎接第三次能源革命和第四次工业革命

