

2021年中国电动汽车百人会年会高层论坛报告



面向碳中和的新能源汽车创新与发展

欧阳明高

ouymg@tsinghua.edu.cn

新能源Leader

背景：2020年—新能源汽车发展的里程碑

- ◆ 2020年是新能源汽车行业峰回路转、喜出望外的一年。是新能源汽车2012-2020规划圆满收官的标志年
- ◆ 新能源汽车大规模进入家庭元年。新能源汽车从政策驱动到市场驱动的转折年。
- ◆ 新能源汽车可持续发展政策纷纷出台，新能源汽车2035规划发布、2030/60碳达峰/碳中和宏伟目标提出。

背景：动力变革与能源革命

每次能源革命都是先发明了新动力装置和交通工具，然后带动对能源资源的开发利用，并引发工业革命

◆ 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

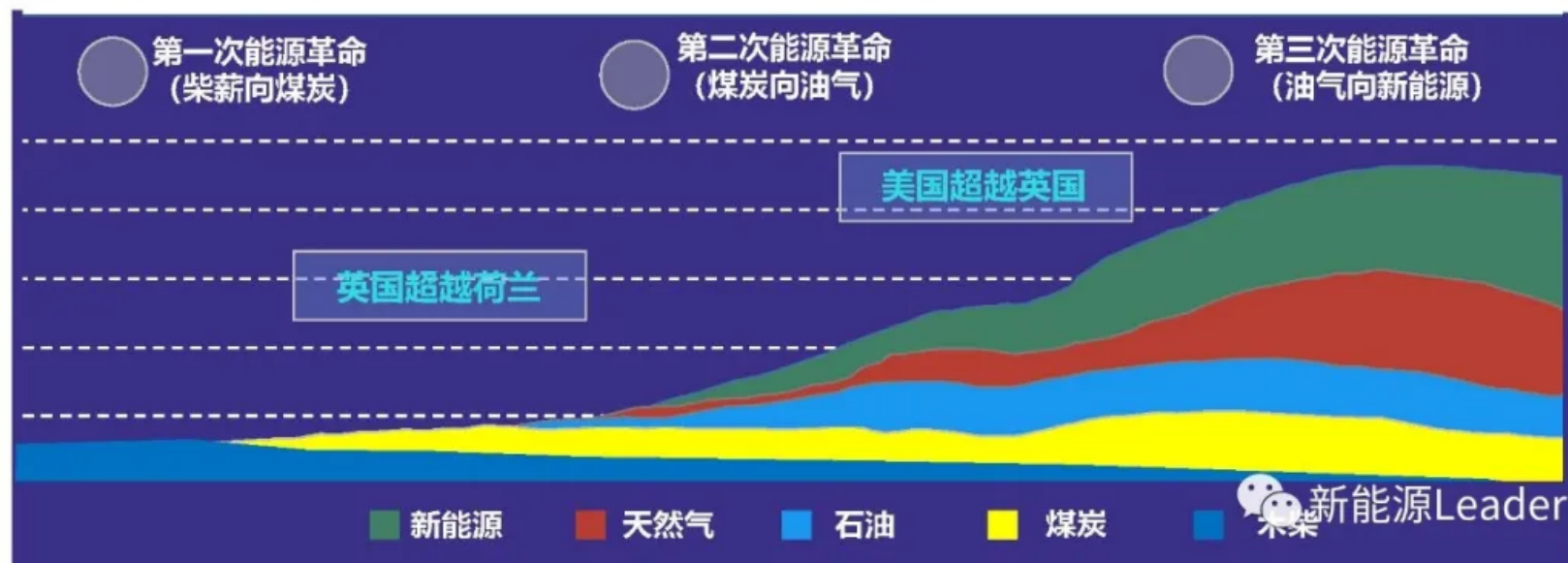
◆ 第二次能源革命

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：电池（光伏电池/锂离子电池/氢燃料电池），能源：可再生能源，能源载体：电和氢，交通工具：电动车

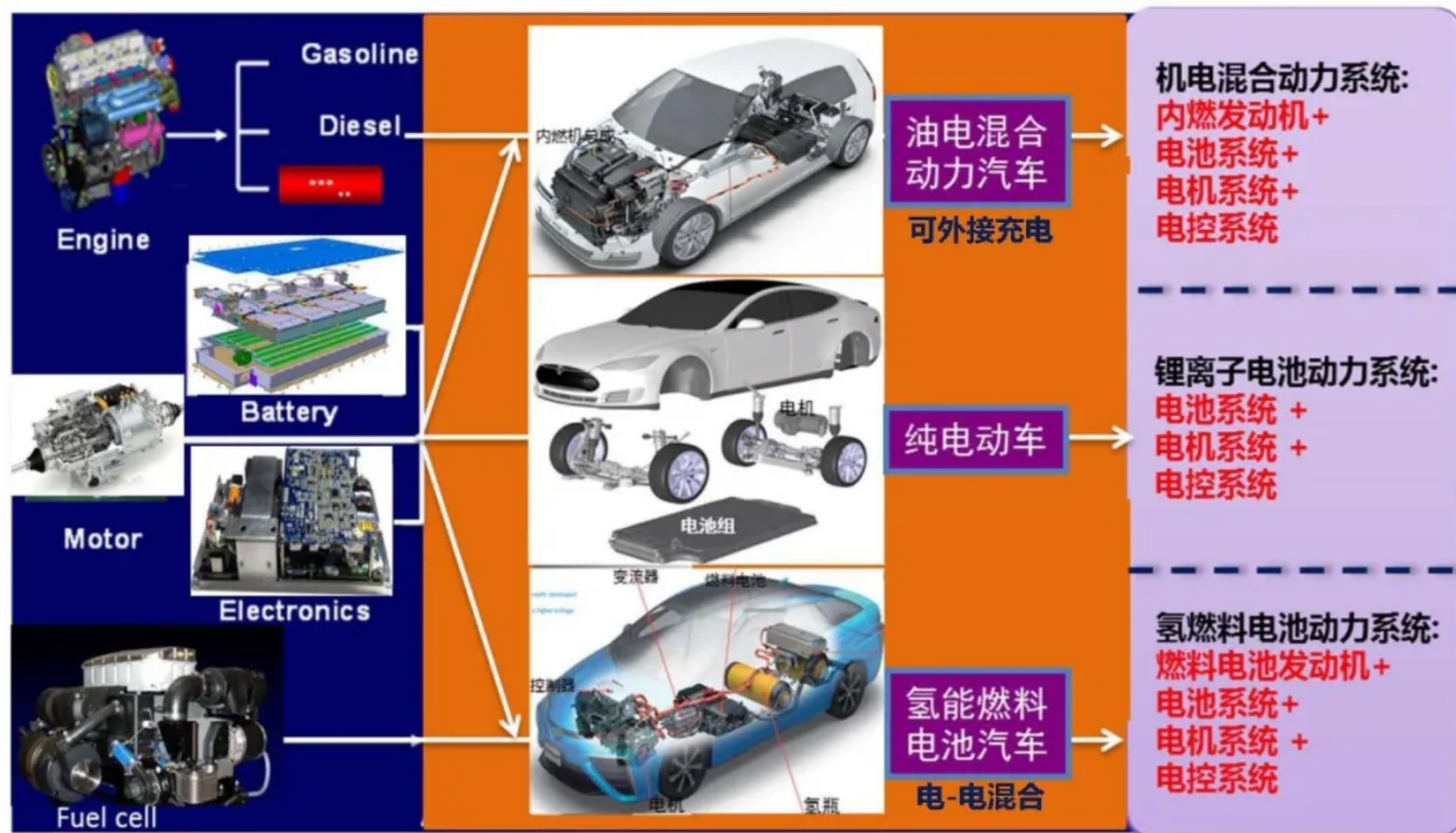
第四次工业革命：以可再生能源为基础的**绿色化**和以数字网络为基础的**智能化**



从能源与工业革命高度全面看新能源汽车

- ◆ **动力电动化新进展**
(电动车革命)
- ◆ **能源低碳化新要求**
(新能源革命)
- ◆ **系统智能化新趋势**
(人工智能革命)

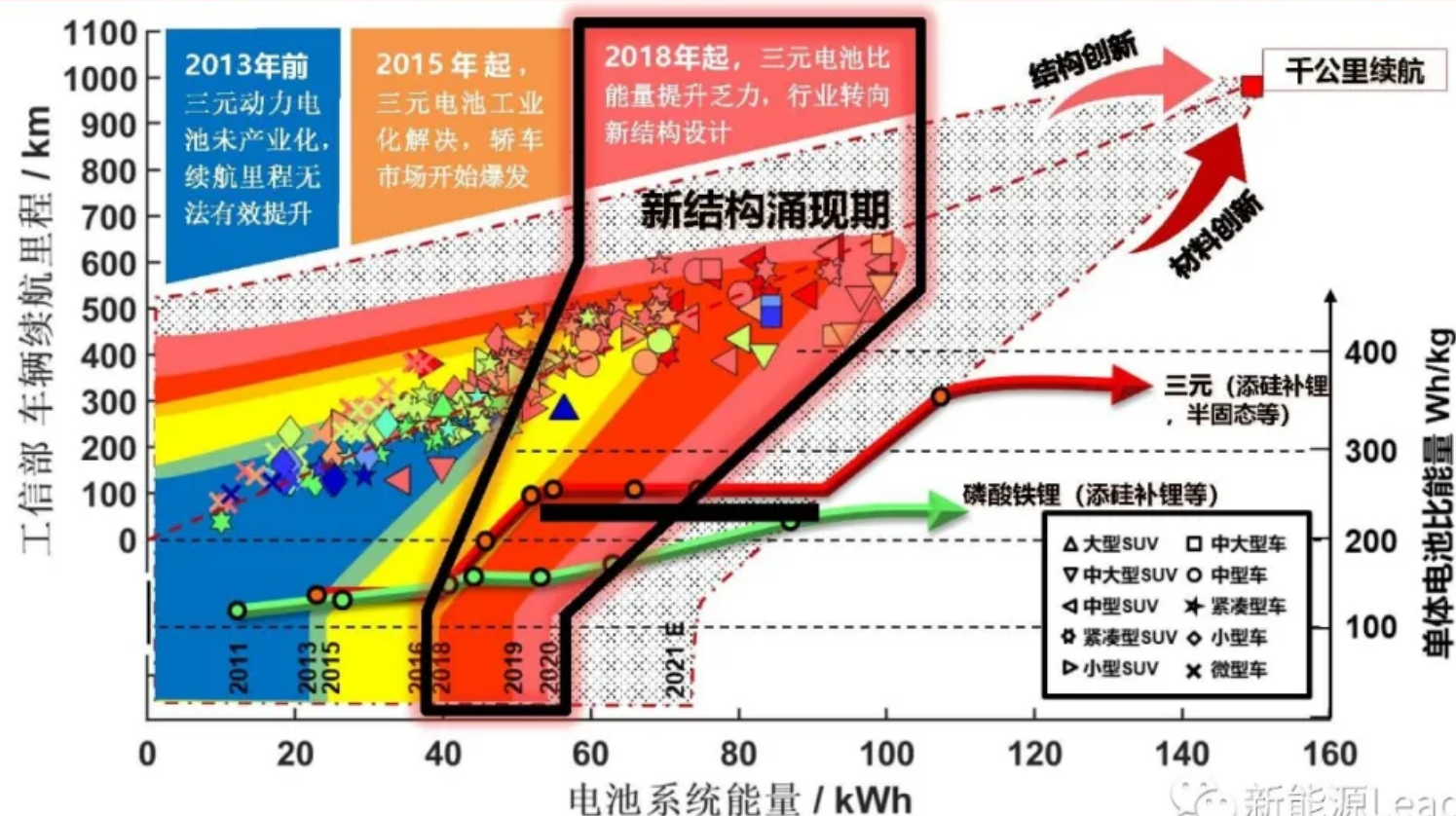
电动化:汽车动力百年来的重大技术变革



锂离子电池的发明实现了蓄电池领域百年来的历史性突破

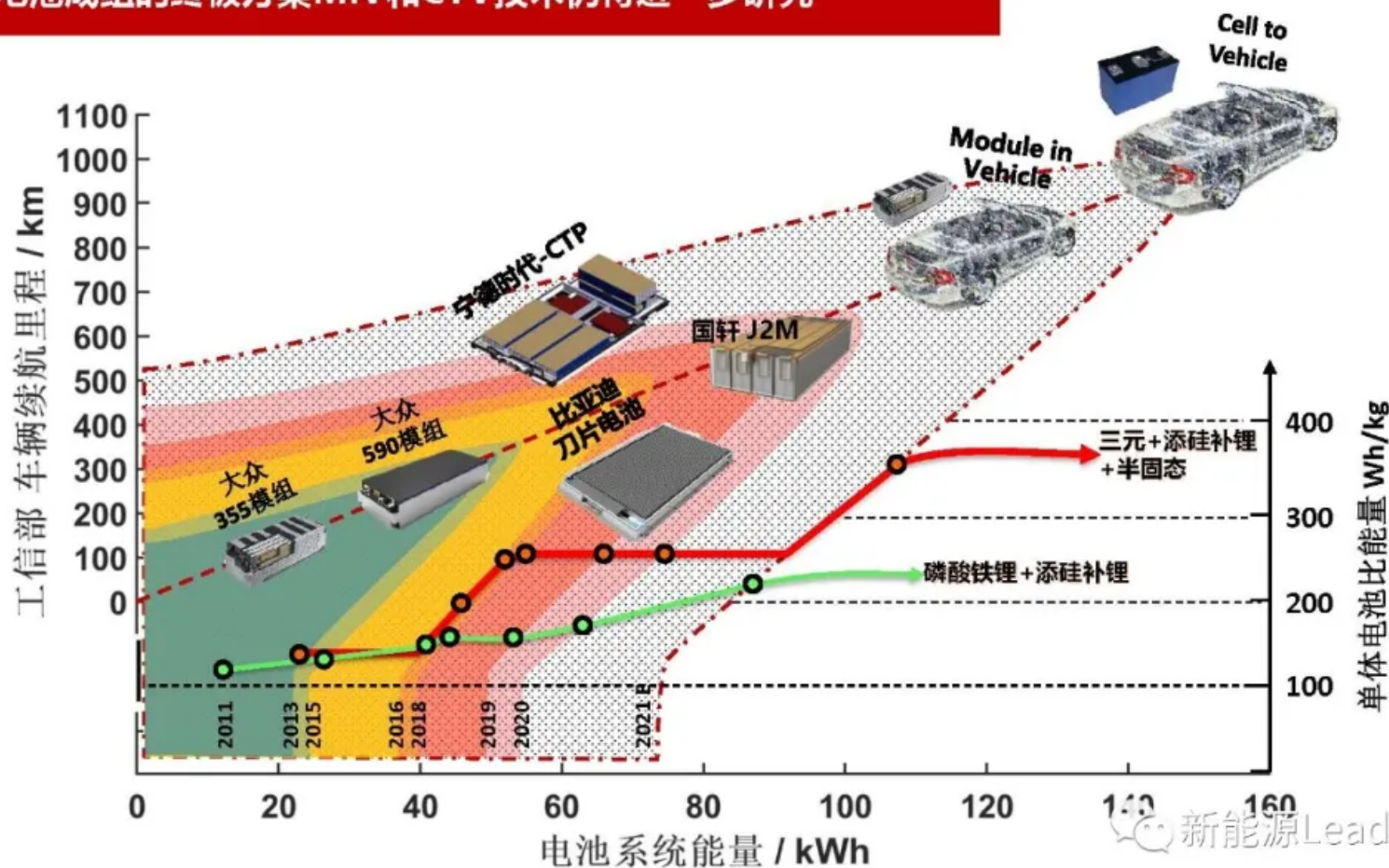
中国纯电动车动力电池技术创新活跃

- ◆ 中国动力电池技术创新模式从政策驱动向市场驱动转型，从行业政治操作向公司商业运作转型；
- ◆ 电池材料创新要平衡比能量、寿命、快充、安全、成本等相互矛盾的性能指标，近年尚无大突破；
- ◆ 电池系统结构创新辅以电池单体材料改进成为近年来中国动力电池技术创新的鲜明特征。



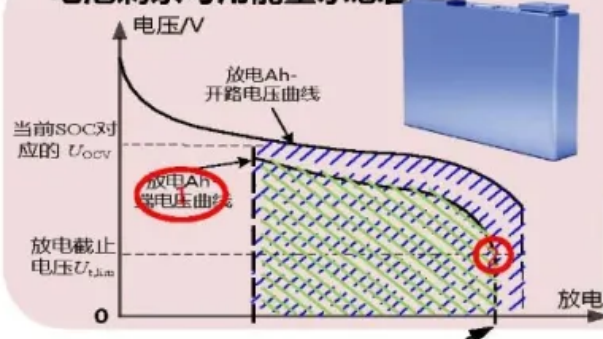
中国纯电动车动力电池结构创新进展

- ◆ 2019年起，中国企业发挥电芯制造优势，厚积薄发，在电芯结构上连续推出CTP，刀片电池，J2M等技术，超越大众的VDA、MEB电芯尺寸标准，引领了电池系统结构技术创新；
- ◆ 电池成组的终极方案MIV和CTV技术仍待进一步研究



纯电动汽车的低温续航问题

电池剩余可用能量示意图



电芯性能下降



制热需求上升

- 乘客舱加热
- 电池包加热

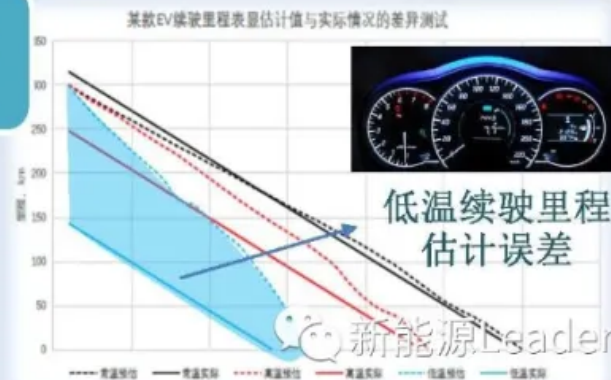
低温续航缩水

动力系统效率降低



- 制动能量回收下降
- 轮胎滚动阻力上升
- 整车风阻系数上升

里程估计精度下降



低温续航问题改善途径

中国电动车环境适应性问题技术需求迫切，技术创新活跃

1. 电池热管理系统效能优化，提高冬季续驶里程

PTC加热

云端控制，提前预热

热泵空调

补气增焓，提升低温效能

电机激励加热

方案创新，提升性能、降低噪声

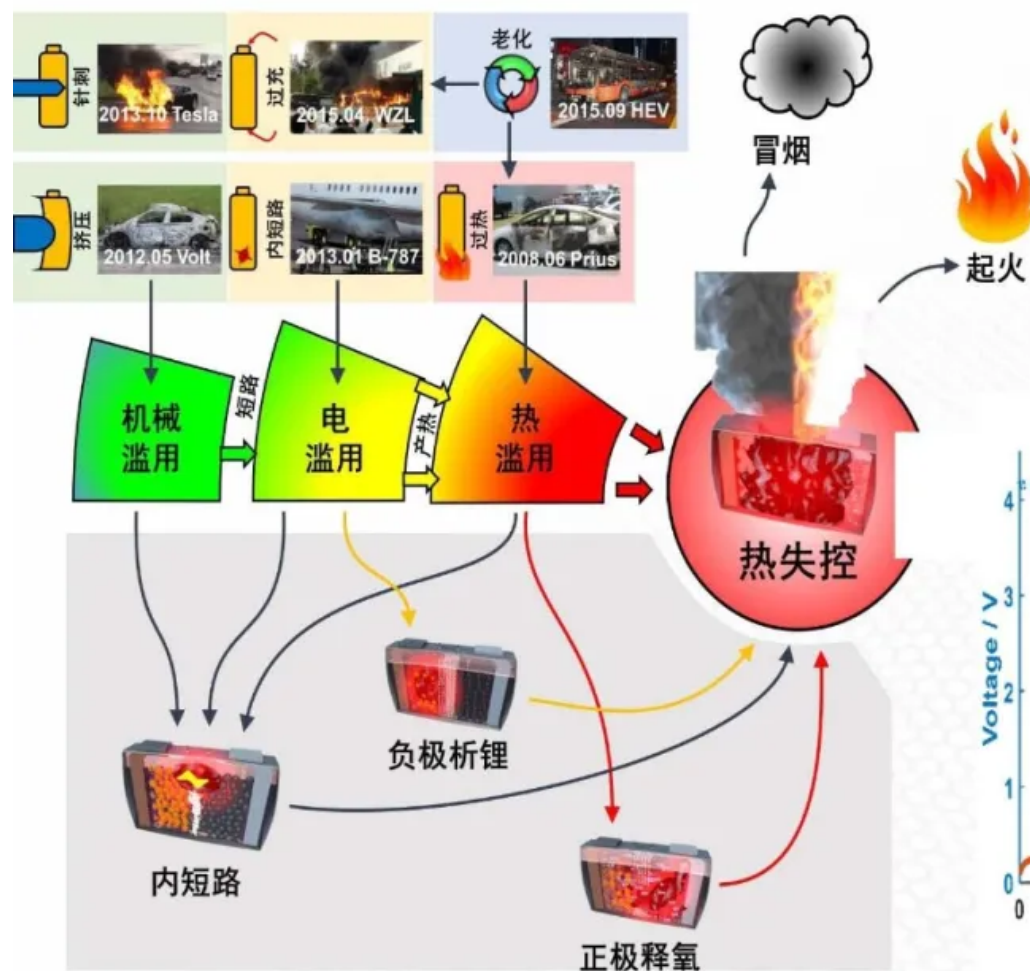
2. 面向冬季工况的动力系统废能综合利用

- 回收电机运行废热，用于电池加热
- 无法回馈至电池的制动电能可用于PTC加热，提高回馈制动占比

3. 充电场景下电池的插枪保温和脉冲加热

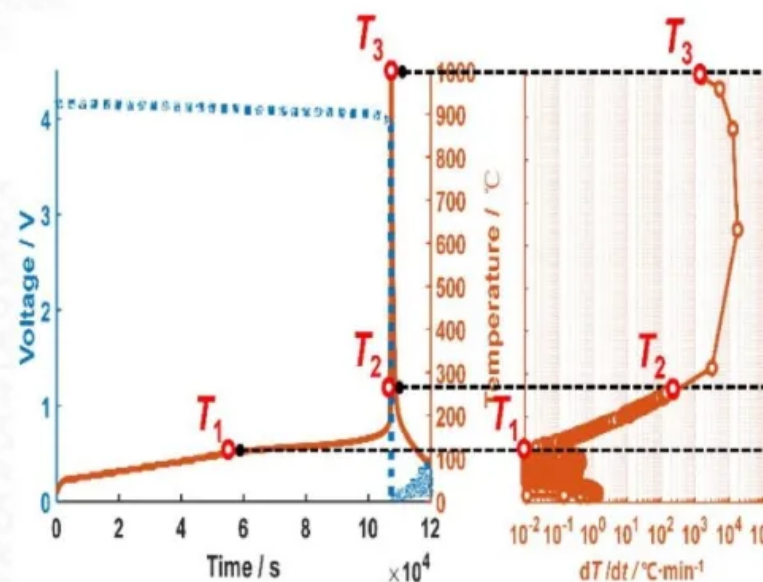
- ◆ 慢充桩插枪保温
- ◆ 快充桩脉冲保温

纯电动汽车动力电池热安全问题



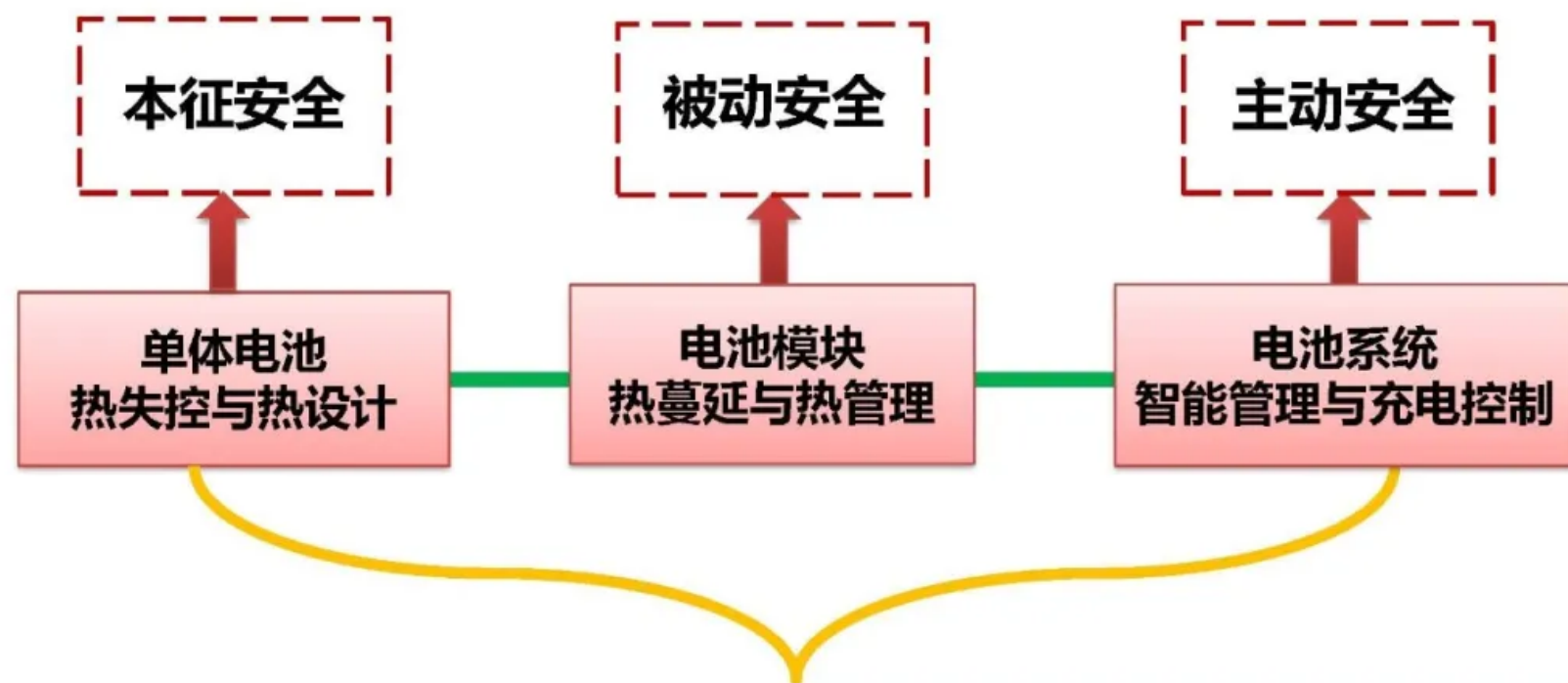
电池热失控过程

- T1: 自生热起始温度;
- T2: 热失控触发温度;
- T3: 热失控最高温度



纯电动汽车动力电池热安全解决途径

中国动力电池安全问题研究早，热失控科学与技术走在世界前列

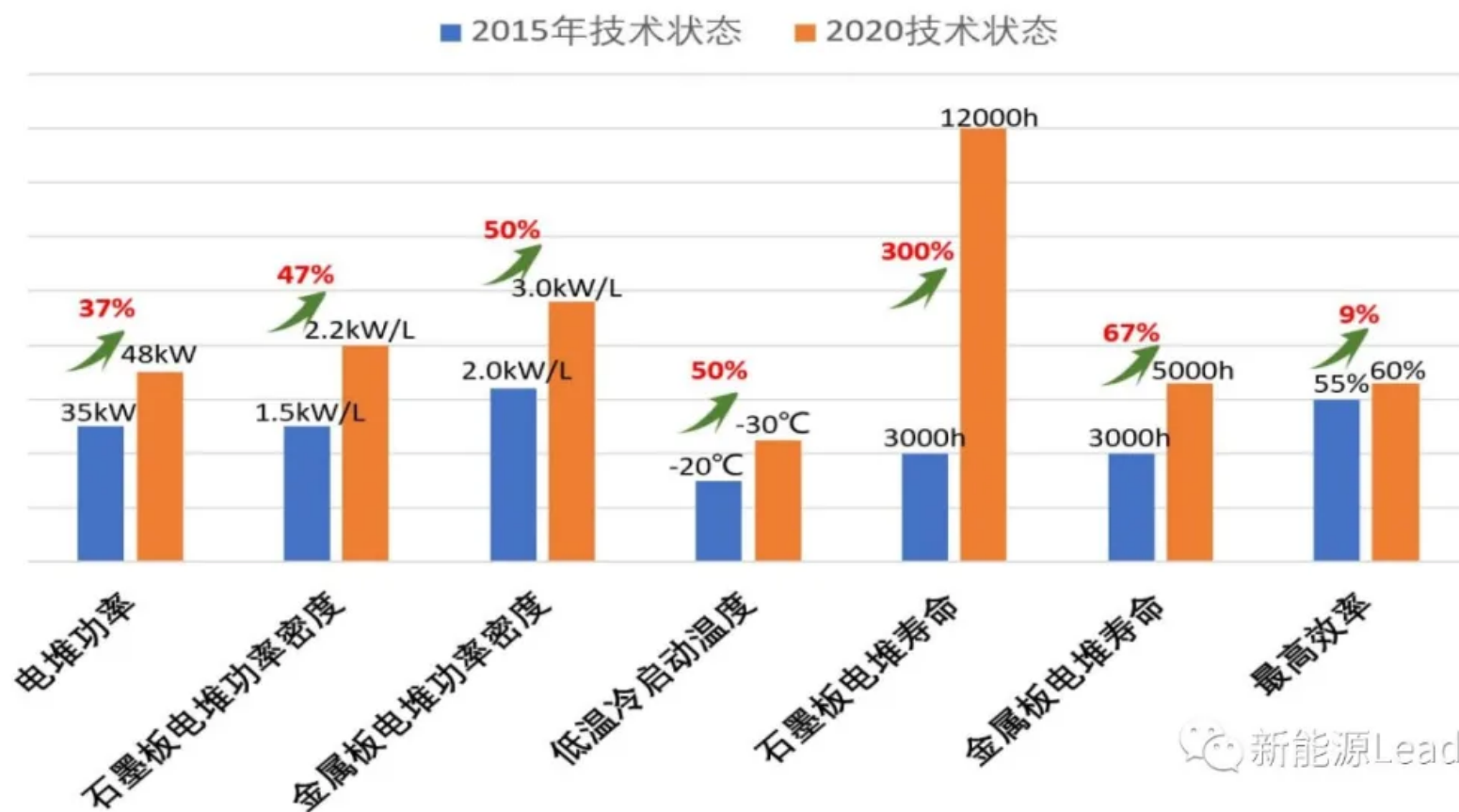


安全是所有汽车追求的永恒主题，安全是靠安全技术保障的

氢燃料电池汽车技术现状及趋势

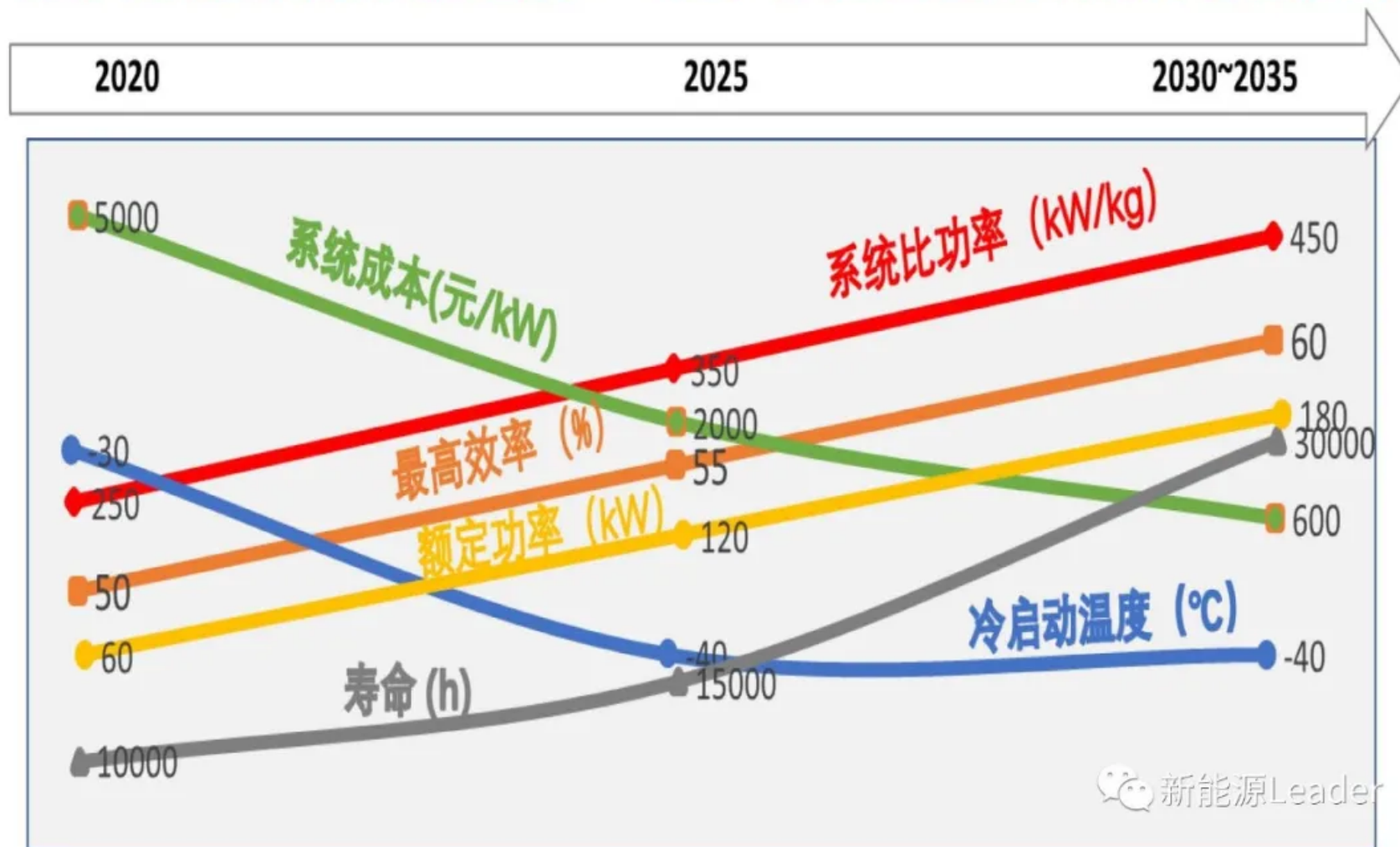
经过长期艰苦努力，中国车用燃料电池技术近年来取得产业化突破

- ◆ 燃料电池功率密度、冷启动温度、寿命以及最高效率等指标上均有大幅度改善
- ◆ 国产燃料电池零部件产业链已经建立，系统集成能力大幅增强。头部企业正在形成。



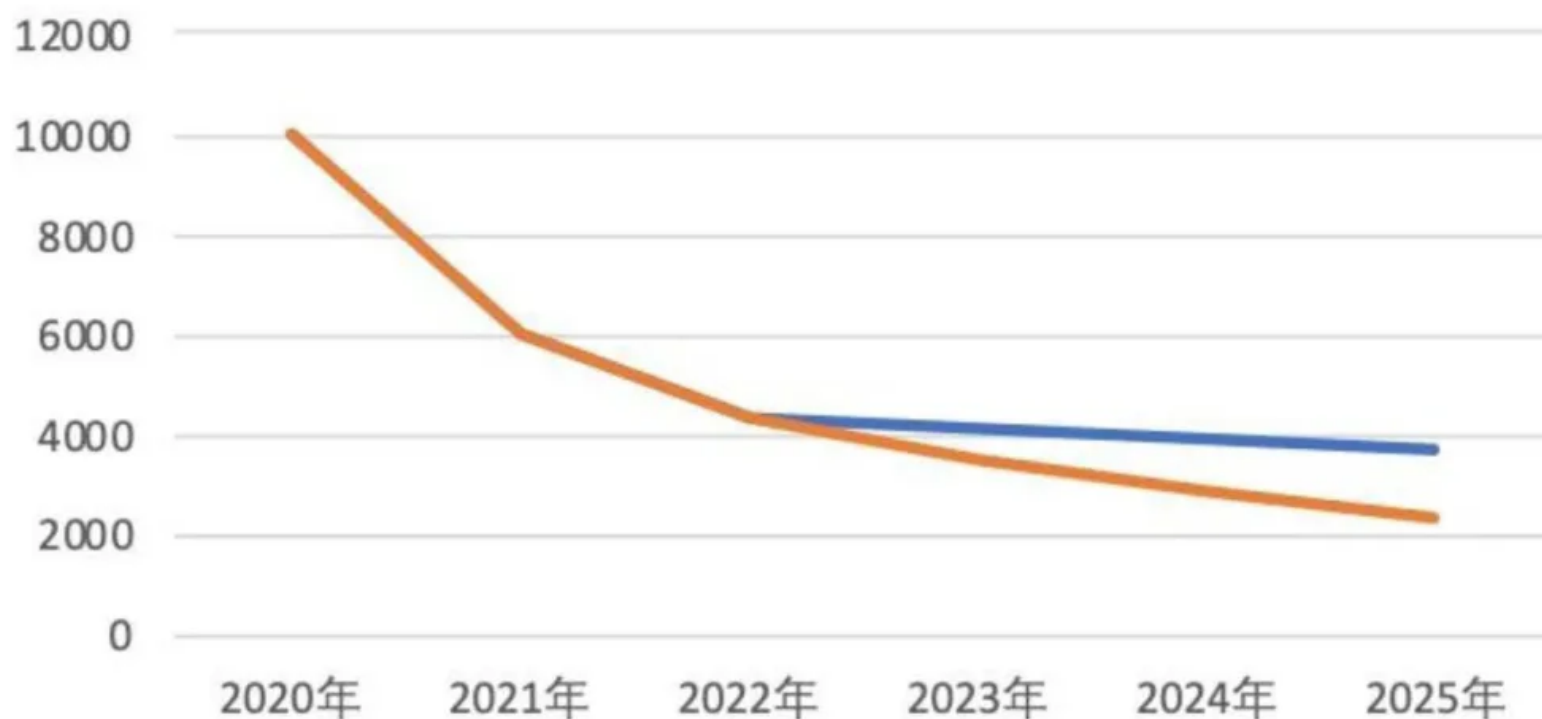
商用车燃料电池发动机技术路线图

今后十年左右燃料电池系统成本下降80%以上，与过去十年锂离子电池成本下降过程相似



燃料电池汽车关键部件技术经济性预测

国产70MPa塑料内胆碳钎维缠绕车载储氢瓶单位储氢（公斤）成本预期



— 单位储氢成本（元/kg）不考虑纤维成本变化

— 单位储氢成本（元/kg）2025年vs2020年 碳纤维降50%成本

2020版氢能与燃料电池汽车技术路线图



有待解决的问题: 氢能产业链的自主化程度和技术水平, 和燃料电池比还有差距。
电解绿氢技术、氢储运技术以及氢安全技术还需改进提升, 氢燃料成本总体偏高。

基于化石能源看各类轿车油井到车轮能效比较

- ◆ 三种电动汽车都比传统汽油车能效高很多，所以各种电动汽车都是节能的；
- ◆ 基于化石能源的纯电动、燃料电池、混合动力三种电动汽车能效差别不大；
- 油电混合动力似乎是合理选择，为什么非要搞纯电动和燃料电池汽车？

	Energy pathway	Well-to-Tank 50%	Tank-to-Wheel 50% ^{*1}	Well-to-Wheel ^{*1} 油井到车轮能效 20% 40%
FCHV-adv 燃料电池汽车	Natural gas ↓ Reforming with membrane separation ↓ Hydrogen (70MPa)	67% ^{*2}	59%	40%
EV 纯电动	Natural gas ↓ Combined cycle power generation ↓ Electricity	39%	85%	33%
Gasoline HV (Prius) 汽油混合动力	Crude oil ↓ Refine ↓ Gasoline	84%	40%	34%
Gasoline ICE 汽油车	Crude oil ↓ Refine ↓ Gasoline	84%	23%	19%

^{*1} Tank-to-Wheel efficiency: measured in the Japanese 10-15 test cycle

^{*2} Difference of Well-to-Tank efficiency between 35MPa and 70MPa: approx. 3%

(Toyota Calculation)

新能源Leader

从能源与工业革命高度全面看新能源汽车

◆ **动力电动化新进展**
(电动车革命)

◆ **能源低碳化新要求**
(新能源革命)

◆ **系统智能化新趋势**
(人工智能革命)

新能源汽车是用新能源的电动汽车，新能源汽车可以推动新能源革命



实现能源革命的“五大支柱”

- 一，向可再生能源转型（尤其是光伏与风电）；
- 二，集中式转向分布式，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

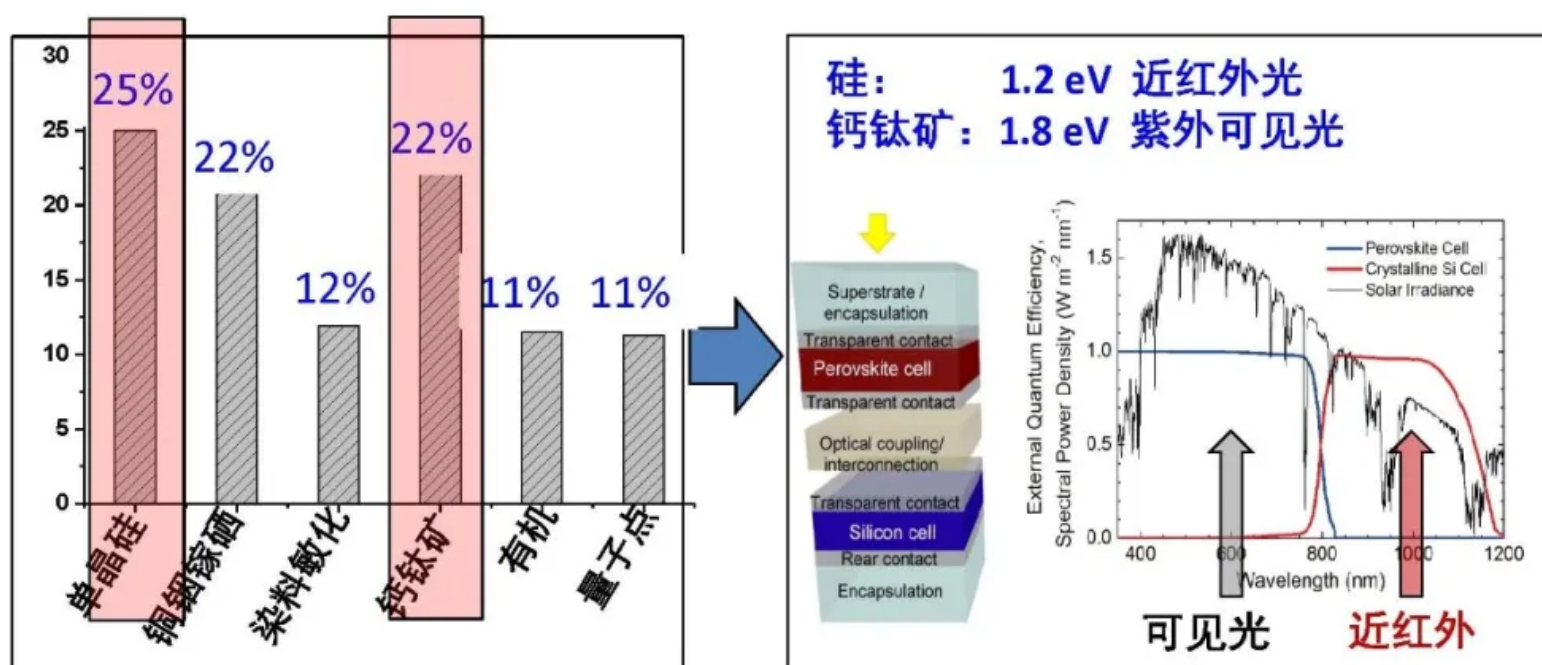
◆ 习主席提出2030/60低碳发展目标和能源革命重大战略；

◆ 中国的光伏和风电技术与成本已经完全具备大规模推广条件，但是储能是瓶颈，需要靠电池、氢能、电动汽车等来解决；

◆ 只有实现新能源汽车大规模发展才能实现新能源革命，只有实现新能源革命才能实现中国碳中和目标。

可再生能源的载体：电和氢

- 在中国光伏发电成本已经与煤电相当，IEA预测光伏将是综合成本最便宜的能源
- 硅基光伏与钙钛矿相结合的第三代光伏电池技术正在兴起、效率潜力巨大



单节太阳能电池

新型高效材料设计

界面修饰方法

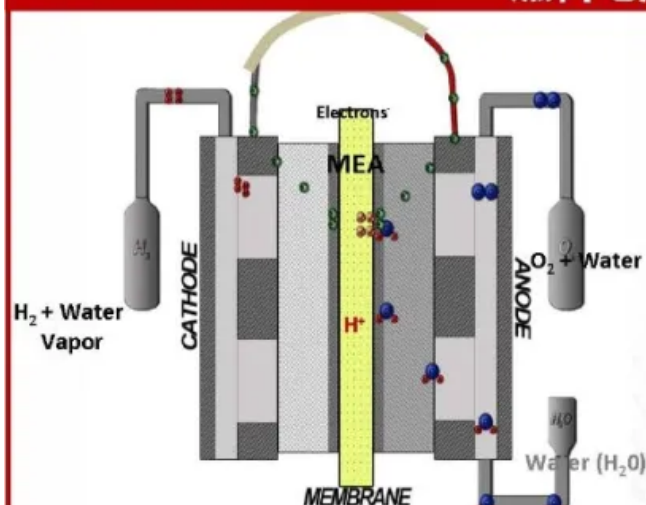
叠层太阳能电池
将突破效率30%

新能源Leader

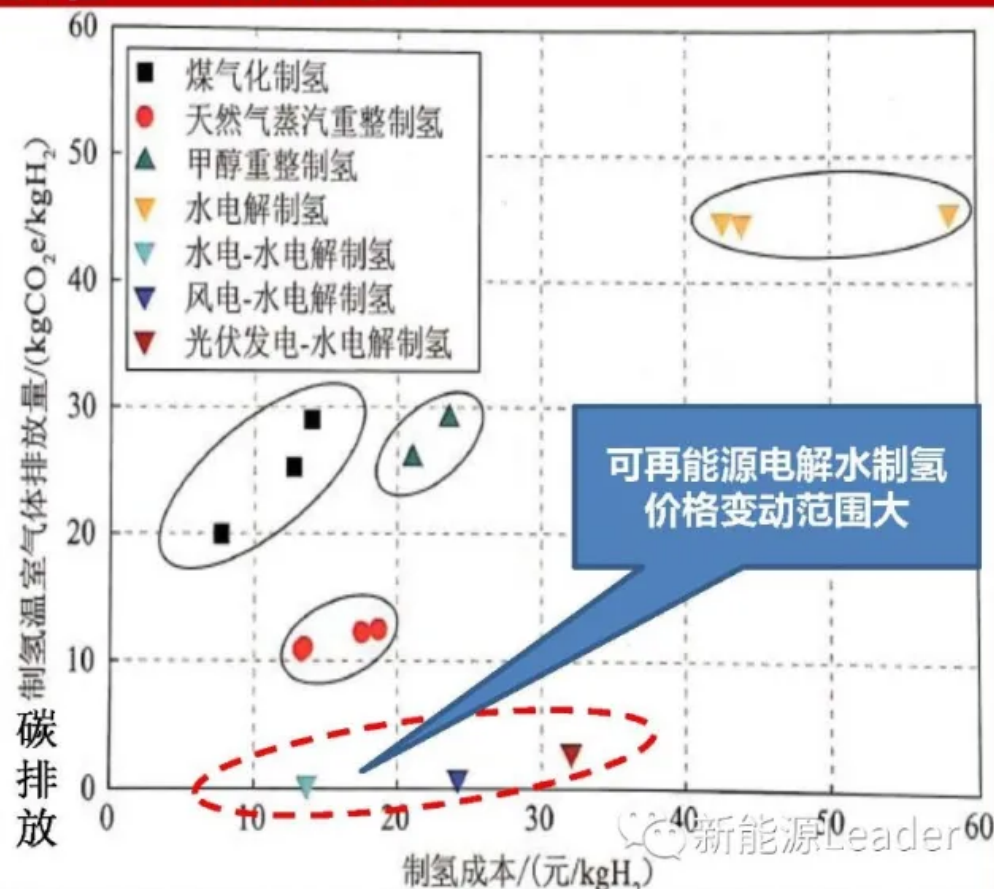
可再生能源的载体：电和氢

- ◆ 面向碳中和前景，氢能汽车只是氢能应用的一部分，或者说是先导部分。
- ◆ 氢能不仅仅是为了汽车。发展氢能汽车的使命之一是为了带动氢能的全面利用。

燃料电池逆过程——电解制氢技术



Electrolyser 质子膜水电解装置



可再生能源的载体：电和氢

电解制氢技术对比

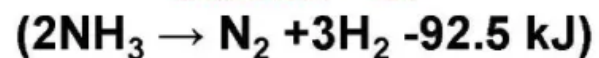
	碱性电解 AEC	质子膜电解 PEMEC	固体氧化物电解 SOEC
运行参数			
电池温度 (°C)	60-90	50-80	700-900
典型压力 (bar)	10-30	20-50	1-15
电流密度 (A/cm ²)	0.25-0.45	1.0-2.0	0.2-1.0
负载弹性 (额定负载%)	20-100	0-100	-100/+100
冷启动时间	1-2h	5-10min	Hours
热启动时间	1-5min	< 10s	15min
效率			
电解池效率 (LHV)	63-71%	60-68%	~100%
电解池能耗(kWh/Nm ³)	4.2-4.8	4.4-5.0	3
系统效率 (LHV)	51-60%	46-60%	76-81%
系统能耗 (kWh/Nm ³)	5.0-5.9	5.0-6.5	3.7-3.9
生命周期 (kh)	55-120	60-100	8-20
投资成本 (¥/kW)	6000-12000	11000-16800	> 16000

可再生能源的载体：氢的载体E-FUEL

液氨

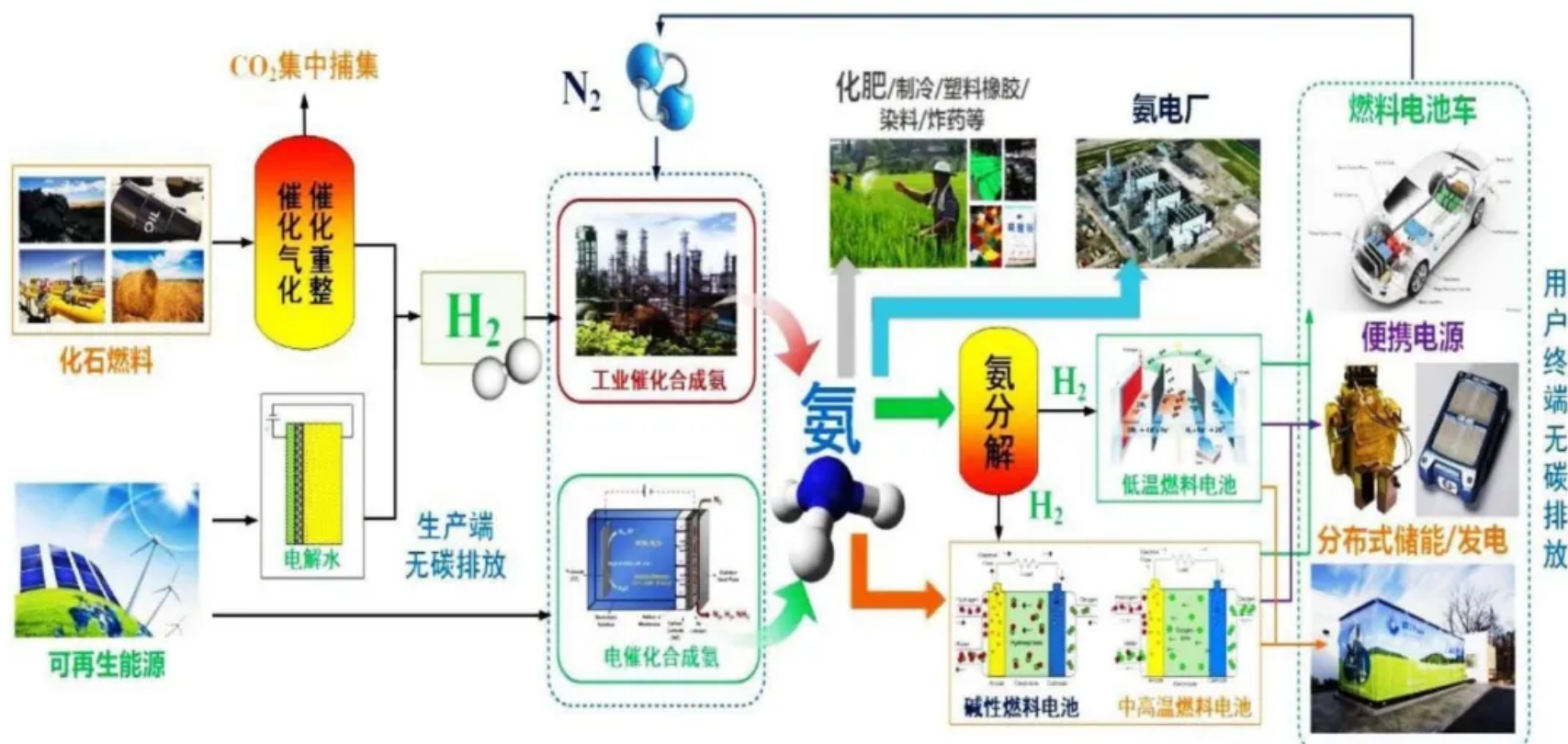


氨分解产氢



质量储氢密度：17.8wt%

体积储氢密度：12kg-H₂/100L

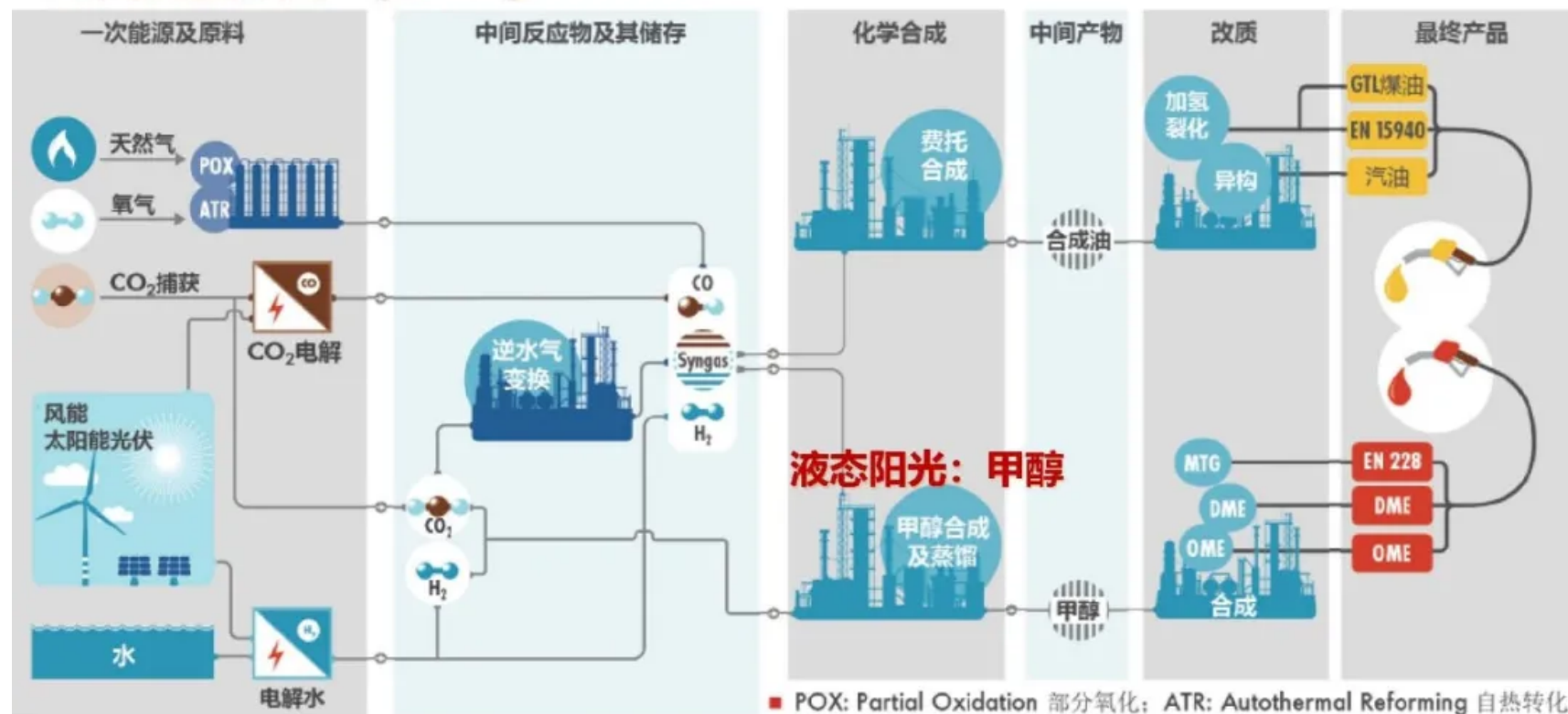


新能源Leader

Chen, Nature Reviews Materials, 2016, 1, 16059.

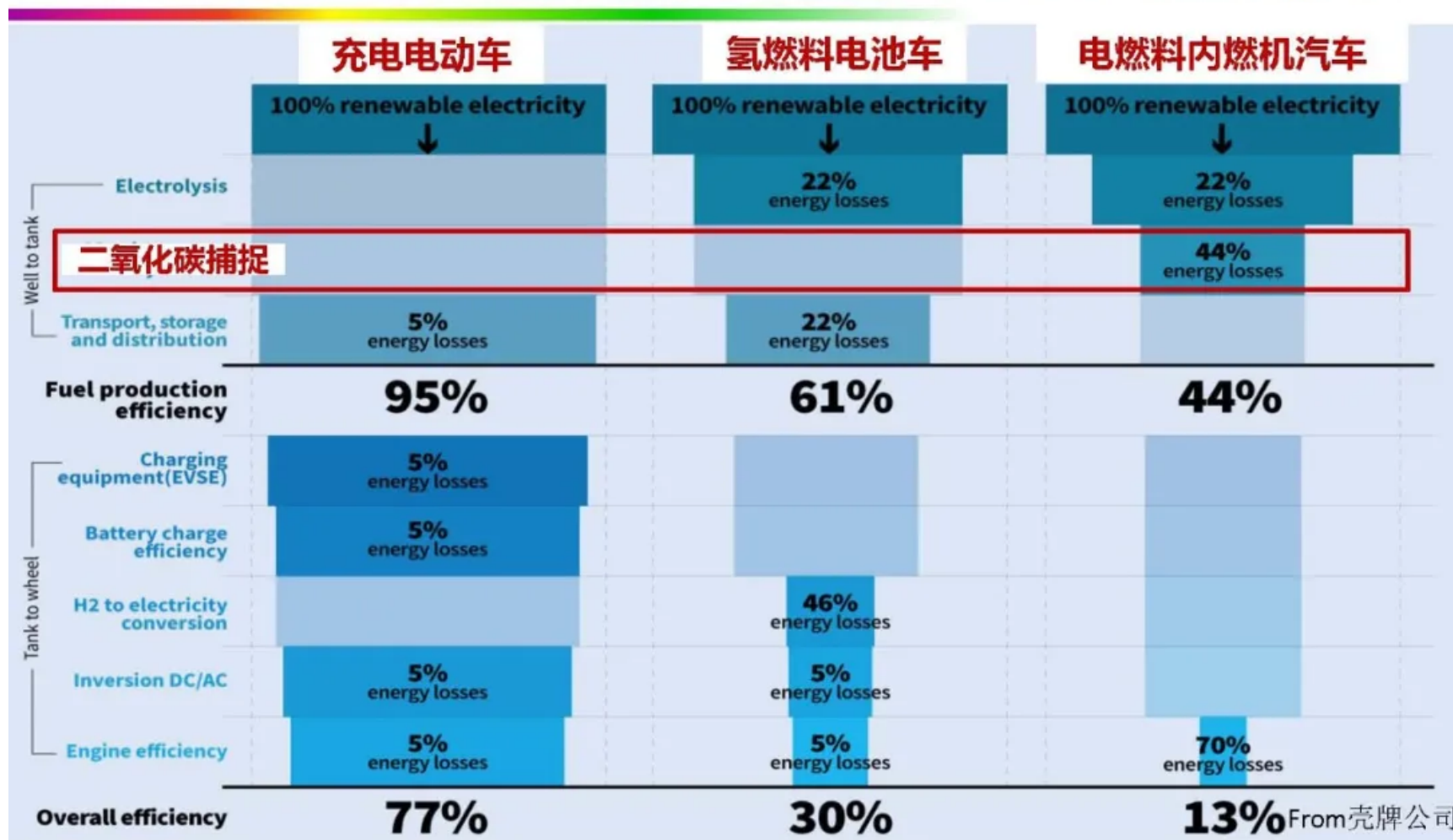
可再生能源的载体：氢的载体E-FUEL

电合成燃料 (PTL)



- ◆ PTL 燃料使用端不需要建立新基础设施，然而在生产端仍将需要建立大量基础设施；
- ◆ 生产1 升的PTL 燃料需2.9~3.6 kg CO₂ 如从空气中捕获，需要建大型碳捕集及利用设施；
- ◆ Agora et.al 预测为实现2050 年成为商用燃料的目标，PTL 燃料交付成本应约为每升1美元。

基于可再生能源的能源动力组合全链条能效分析



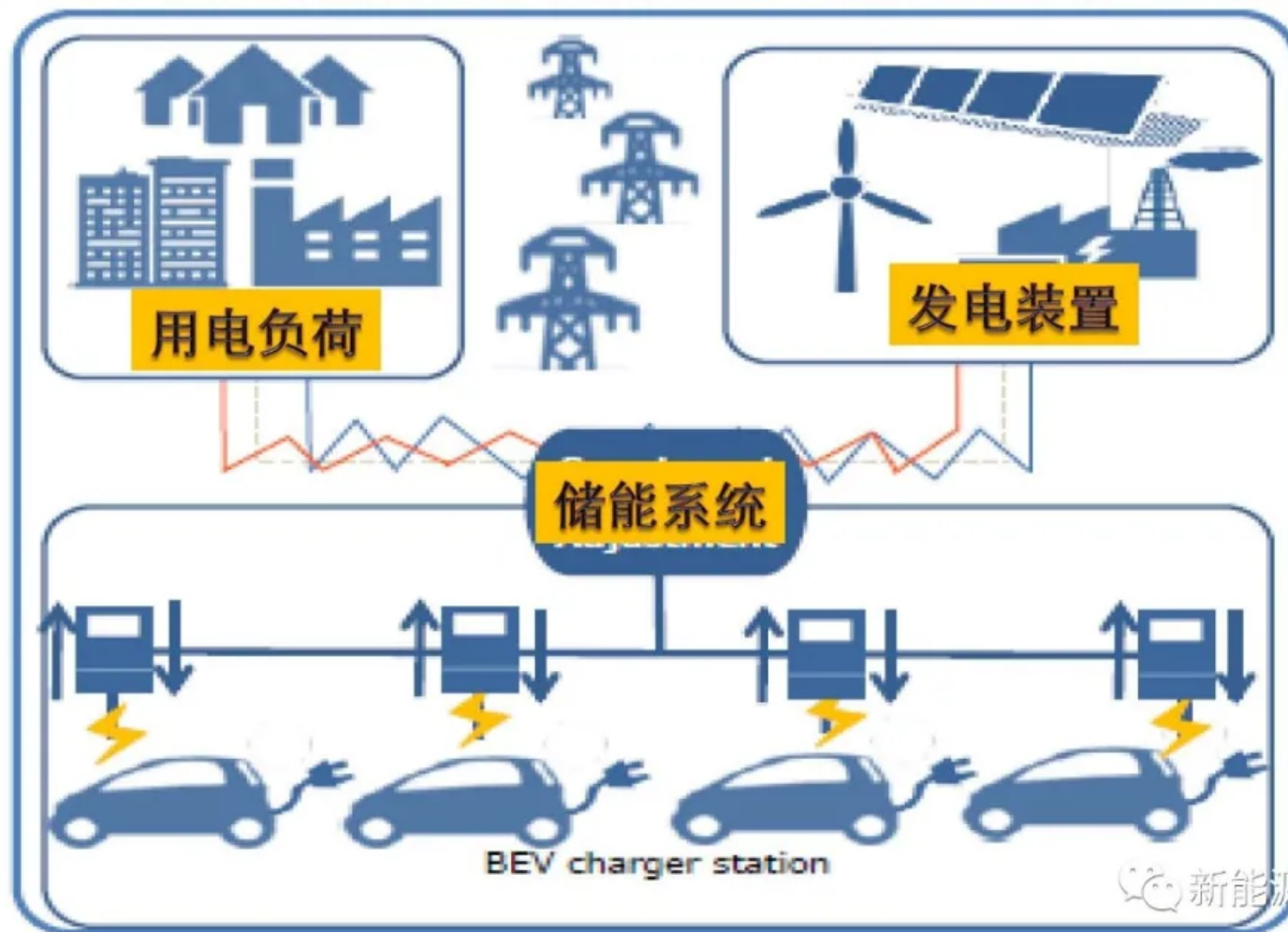
如果电价相同，总体能效差别等于成本差别。充电电池能干好的事就别用氢燃料电池；
制氢用的电价有可能比充电电价便宜吗？

从能源与工业革命高度全面看新能源汽车

- ◆ 动力电动化新进展
(电动车革命)
- ◆ 能源低碳化新要求
(新能源革命)
- ◆ 系统智能化新趋势
(人工智能革命)

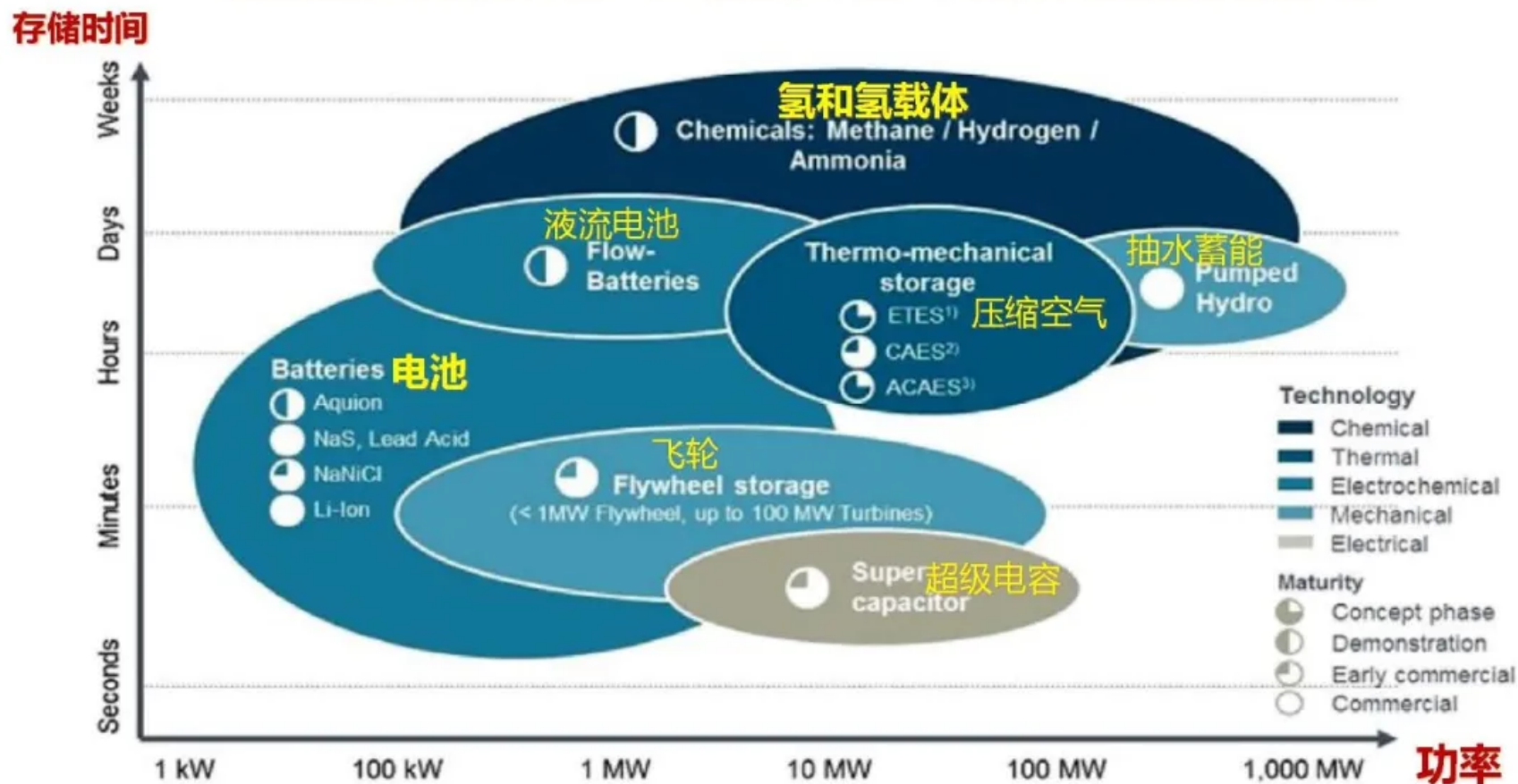
基于可再生能源的智慧能源系统

负荷、电源、储能和网络协同互动，共同构成电力系统，电价不仅仅由发电成本决定



智慧能源系统的核心技术：储能技术

电池和氢能各有特点，两者互补性强，共同构成主流储能方式



¹⁾ Electro-Thermal Energy Storage

²⁾ Compressed Air Energy Storage

³⁾ Adiabatic Compressed Air Energy Storage

新能源Leader

Valera-Medina A, Xiao H, Owen-Jones M, et al. Ammonia for power[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2018, 69: 63-102.

智慧能源系统的核心技术：电池储能技术

以锂离子电池为代表的动力电池是短周期分布式小规模可再生能源储存的最佳选择

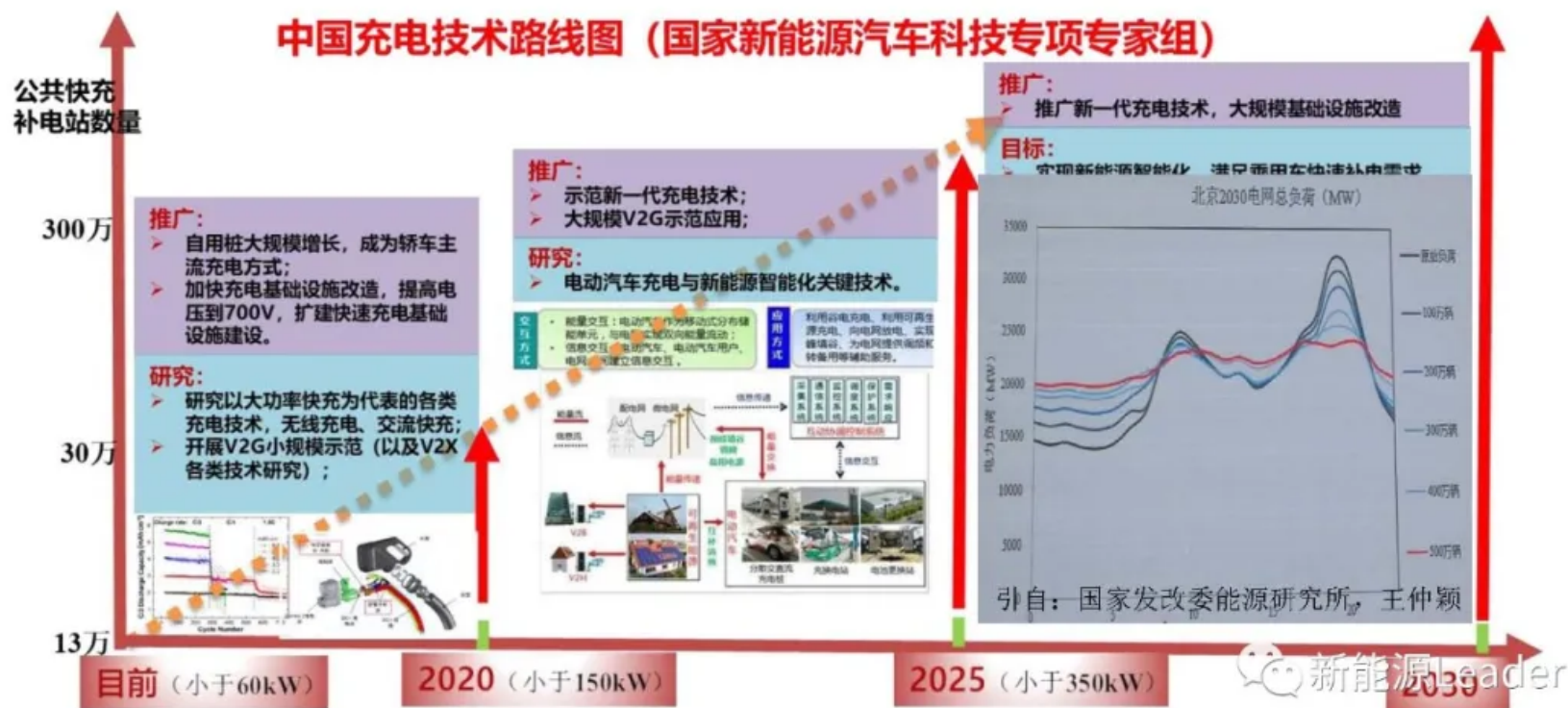


Source: Bloomberg New Energy Finance

新能源Leader

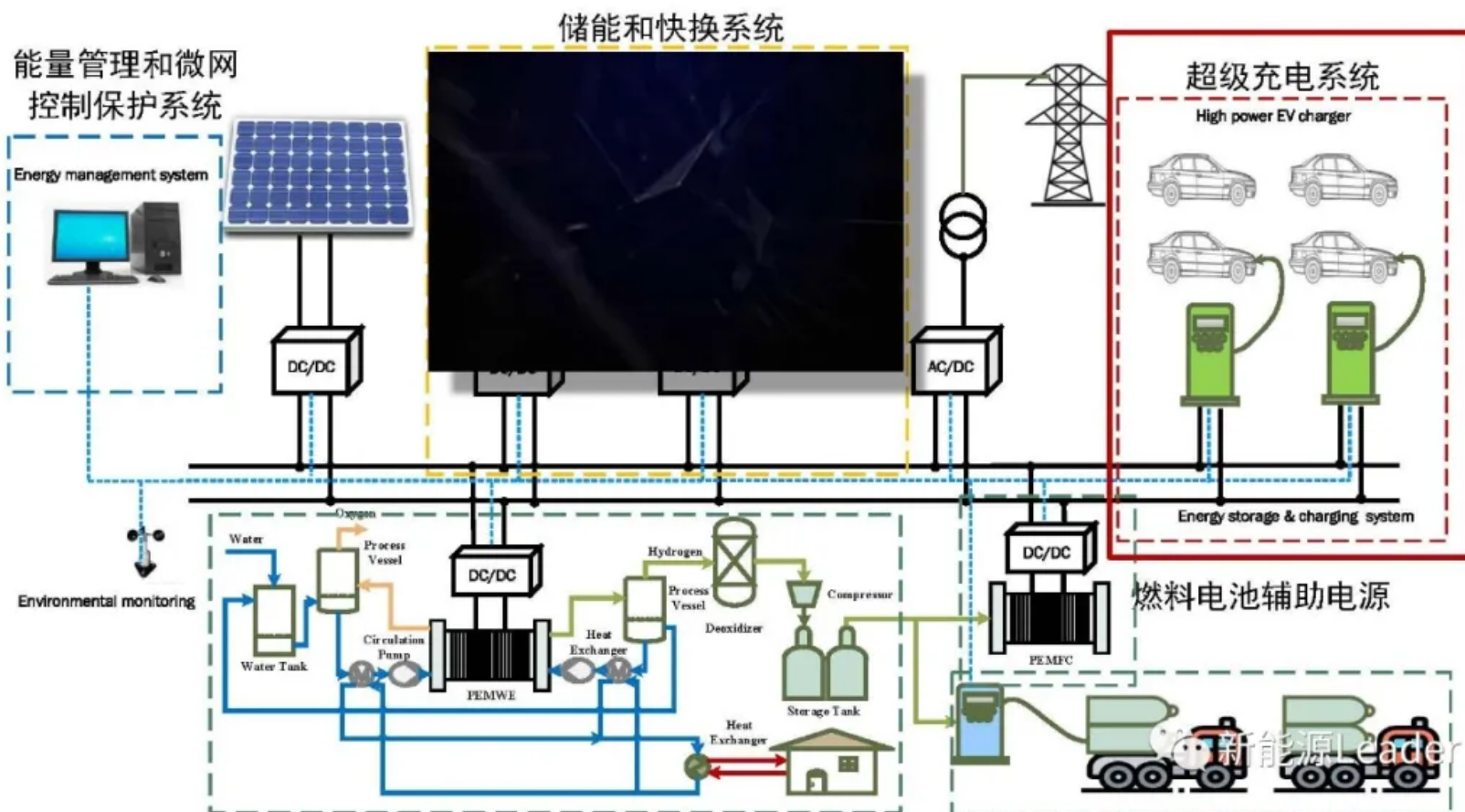
智慧能源系统的核心技术：智能充电车网互动与共享储能

- 如有1亿辆电动汽车，车载电池能量达50亿度电左右，储能潜力巨大，充电功率巨大，耗电量不大
(如果3亿辆中国乘用车全部都改为电动轿车，每辆车平均65千瓦时，则车载储能容量约200亿千瓦时，与中国每天消费总电量基本相当；如果10%的电动车按50千瓦中等速率同时充电，则3亿辆车的充电总功率达15亿千瓦与全国电网总装机功率相当。按平均每辆轿车年行驶2万公里，则3亿辆车每天消费电量约20亿千瓦时，占比10%)
通过能源互联网共享储能抑制可再生电力波动，通过有序充电和智能充电解决充电功率达的挑战



智慧能源系统的核心技术：光-储-充-换多能互补微网系统

- ◆ 对于商业目的的乘用车如共享车、出租车等，原则上换电是一种不错的商业模式
- ◆ 换电的最佳应用场景是电动中重卡；充换电站一体化，换电电池放电快充，形成互补
- ◆ 最终的微网形态将是光-储-充-换多能互补一体化微网系统。



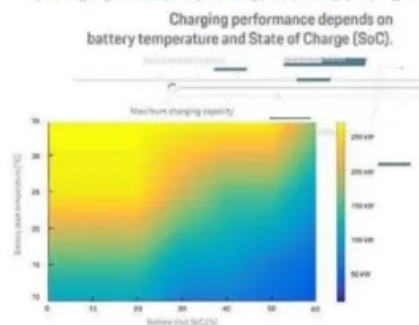
智慧能源系统的核心技术：光-储-充-换多能互补微网系统

- ◆ 对于私家乘用车而言，基于V2G和大功率快充技术的发展前景和电池底盘一体化趋势，中长期更被看好的方式可能还是充电，平时在家或者单位慢充（或车网互动），高速公路长途时超快补电（SOC低于50%）。
- ◆ 2020年中电联公布了中日两国合作制定的大功率快充新标准——“超级充电”，中电联预计2025年可以全面提供超充服务。

安全快充系统集成技术

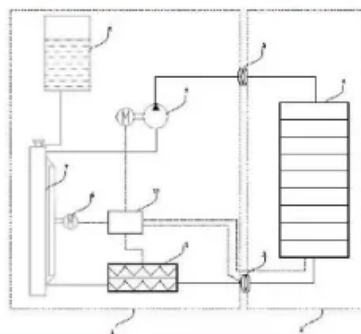
200km@5min

无析锂安全快充技术



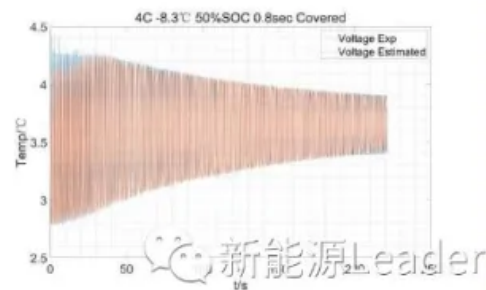
<45°C

外部强制冷却技术



8°C/min

低温脉冲加热技术



智慧能源系统的核心技术：氢能储能技术

氢能是**集中式**可再生能源大规模长周期储存的最佳途径



- ◆ **能源利用充分性**：氢能大容量长时间的储能模式对可再生电力的利用更充分。
- ◆ **规模储能经济性**：固定式储能电池成本比储氢容器成本大约高**10**倍，但车载储能优势下降到**3~5**倍（燃料电池的效率导致储能量比车载动力电池高一倍，同时，储氢体积能量密度低需要更高压力），对降低电价有帮助。
- ◆ **与电网基础发电电源互补性**：作为大容量长周期高功率灵活能源使用；
- ◆ **制运储方式灵活性**：长管拖车经济运输半径300公里以内；1千公里以上可长途输电-当地制氢，或天然气管道掺氢等

*与化石能源分析全链条效率一样，可再生能源生产—运输—储存—利用要讲究（**能源效率**）。电生产和传输成本低，但储存成本高；氢生产成本比电高，储存成本比电低。

智慧能源系统的核心技术：能源互联网新功能

输氢通道比较：特高压是我国绿氢输送的优势通道



绿氢的输送通道和特高压输送通道重合，绿氢已经被电网视为灵活负荷，可在谷段利用特高通道长途输电，当地输氢。

（我国特高压跨区输电能力已达1.8亿千瓦，2019年输电4650亿度，其中清洁能源70%）



单位：元/Kg	现20MPa拖车	30MPa拖车	液氢	特高压	长输管道
绿氢制氢	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
压缩/液化	5	6	12	0	0
1000KM运费	71.43	54.76	7.5	6.67	3.11
3吨站加注成本	12	11	7	14	14
加氢枪出口成本	98.4	81.8	36.5	30.7	27.1

初步结论：

当可再生能源发电为0.12元/KWH，过网费为8分时，通过特高压千公里输电（输氢）通道，在用户侧制氢（谷段约8小时/天）加氢（>3吨/天），可实现加氢枪出口价格在30-40元/Kg，比柴油具有竞争力。

计算依据：特高压输电综合费用（过网费）为0.08元，中长期可再生能源发电成本按0.12元/度计算；氢气长输管线参照西气东输0.28元/KM/千万的综合费用（含增压）计算；

绿氢制氢和液化按照每天8小时计算；液氢液化规模按照30吨/天，运输按照4吨/车计算；绿制氢能力大于2000Nm³/H。

未来十年交通智慧能源生态建设

黄金组合：分布式光伏+电池+电动汽车+物联网+区块链

1T：光伏进入太瓦时代（“2毛钱”电价时代）

1T：电池进入太瓦时代（“5毛钱”“电池时代”）

1亿：电动汽车进入亿辆时代

——分布式光-储-充一体化智慧能源系统

白银组合：集中式风电与光伏+氢能+燃料电池汽车+物联网+区块链

1T：光伏进入太瓦时代

1T：风能进入太瓦时代

1百万：燃料电池汽车进入百万辆时代（1亿千瓦发电功率）

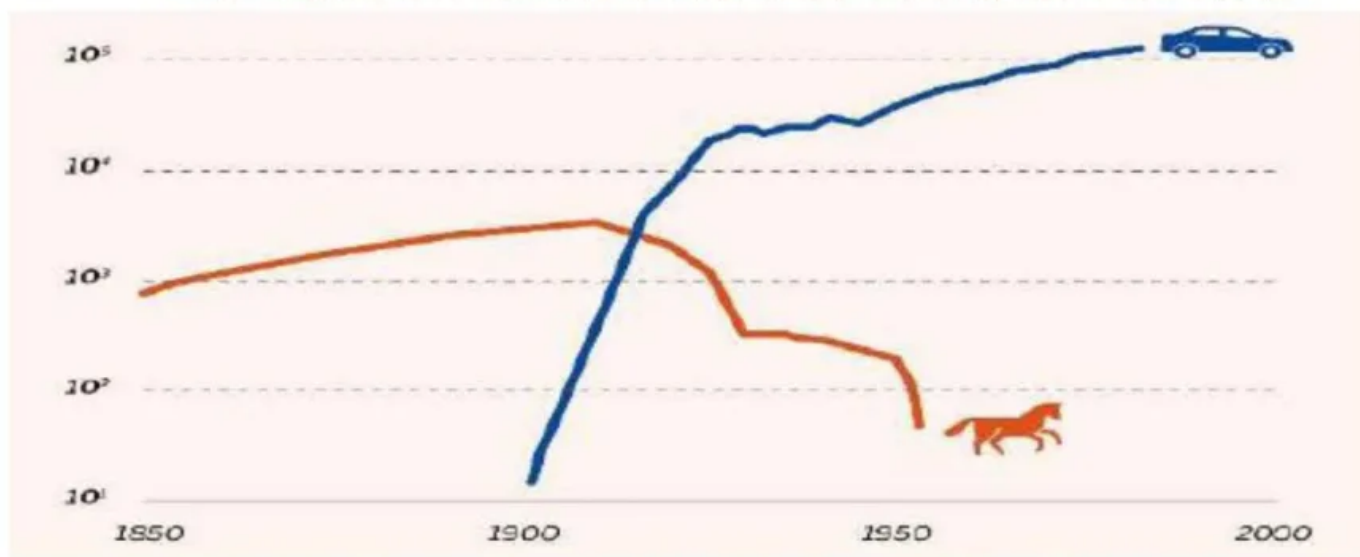
——集中式风-光-氢一体化智慧能源系统

新能源Leader

总结：迎接第三次能源革命和第四次工业革命

◆ 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

100多年前发生了马车到汽车的大变革以及石油行业的大繁荣



◆ 第三次能源革命—**动力**：电池，**能源**：可再生能源，**能源载体**：电和氢，**交通工具**：电动车

今后二三十年交通装备与能源化工相关产业将发生百年未有的大变局

迎接第四次工业革命：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！