

混合型超级电容器技术白皮书

混合型超级电容器是融合双电层物理储能与电化学赝电容/嵌脱储能的新型储能器件，兼具双电层电容器高功率、长循环、宽温的特性，同时提升了能量密度，弥补传统储能功率与能量难以兼顾的短板，适配瞬时大功率能量供给双重需求，可独立或与锂电、燃料电池组成混合系统，在城市交通、轨道交通、工业、储能等场景实现性能与成本的最优平衡，是突破储能器件性能瓶颈、优化系统设计的核心方案。

一、背景与技术痛点

在各类电力系统与储能应用中，传统储能器件始终存在功率与能量难以兼顾的核心矛盾，且在循环寿命、环境适应性、维护成本等方面存在显著短板，成为系统性能优化的关键制约因素：

1. 双电层电容器虽具备高功率密度、百万次循环、宽温工作的特性，但能量密度偏低，无法满足长续航与持续能量供给需求；

2. 锂离子电池能量密度高，可实现中长时储能，但功率响应慢，无法适配瞬时大电流充放电场景，且低温性能差、循环寿命有限，快充与高频次充放电会加速电池衰减；

3. 单一储能器件难以同时满足系统对瞬时大功率与高能量的双重需求，若单纯增大电池或双电层电容器规格，会导致系统体积、重量、成本大幅上升，且能效与可靠性下降；

4. 传统混合储能系统中，双电层电容器与锂离子电池的搭配需复杂的耦合控制电路，系统集成难度大，而不同器件在极端工况下的性能衰减也不一致，导致混合系统的集成难度进一步增加。

在此背景下，混合型超级电容器通过技术融合实现性能互补，成为解决上述痛点

的核心储能器件，兼具实用价值与产业化前景。

二、定义与储能原理

2.1 定义

混合型超级电容器又称不对称超级电容器，是采用非对称电极结构的新型电化学储能器件，结合物理双电层与电化学储能双重机制，是介于双电层电容器与锂离子电池之间的平衡型储能器件。

2.2 储能原理

混合型超级电容器的储能过程为物理与电化学的结合，充电时，电解液中阴阳离子受电场驱动分别向正、负极迁移，正极通过离子在多孔碳表面的物理吸附形成双电层存储电荷；负极通过表面赝电容反应或温和的氧化还原反应实现电化学电荷存储，全程无剧烈化学键断裂与生成。放电时，离子反向迁移，正负极同步释放电荷，物理与电化学过程协同作用，既保留了毫秒级快速响应的特性，又通过负极电化学机制提升了整体能量密度。

2.3 技术定位

混合型超级电容器是功率与能量双优的平衡型储能器件，功率密度接近双电层电容器，能量密度比双电层电容器大一个数量级，填补了双电层电容器与锂离子电池之间的性能空白。可独立作为主储能单元；也可在大功率、长续航场景中与锂离子电池、燃料电池等协同，承担功率缓冲与部分能量供给任务，简化系统集成设计，降低全生命周期成本，广泛适配交通、工业、电网等多领域的储能需求。

三、核心优势

1. 能量密度大幅提升

混合型超级电容器在双电层电容器基础上加入可化学储能的材料，能量密度提

升较双电层电容器提升了一个数量级，提升至 50-150Wh/kg，大幅提升持续储能能力，无需额外搭配器件即可兼顾功率与能量双重需求，适配更多应用场景。

2. 高功率密度

混合型超级电容器融合双电层电容器与锂离子电池的核心优势，功率密度接近双电层电容器，可达 10-40kW/kg，可实现瞬时大电流充放电，满足脉冲功率需求。

3. 长循环寿命

储能过程结合了物理吸脱附和赝电容反应，循环寿命达 10 万次以上，可适配混合动力车辆高频循环等不同场景，高频次充放电下性能无明显衰减，远优于锂离子电池。

4. 宽温度适应性

温度敏感性远低于常规锂离子电池，工作温度区间覆盖 $-40^{\circ}\text{C} \sim +55^{\circ}\text{C}$ 。在 -40°C 的极寒环境下仍可保持低内阻特性，稳定输出大功率；高温工况下亦无副反应加剧、性能骤降问题，在高寒冷启动、高热工业工况、野外极端环境等场景下可靠性显著优于传统锂离子电池。

5. 毫秒级响应特性

响应时间 $\leq 30\text{ms}$ ，可实现毫秒级瞬时功率响应，充放电切换无延迟，适配高频脉冲、瞬时调压等动态工况，相比电化学电池响应更快，可快速平抑波动、稳定电压，适用于高频动态功率场景。

6. 大电流充放电

低等效串联电阻，支持瞬时超大电流充放电，可实现同倍率快充快放，远快于锂离子电池；能高效吸收再生制动、设备启动的脉冲电流。

7. 系统管控简单

充放电曲线接近线性，可通过开路电压估算荷电状态（SOC），大幅降低管理系统

设计难度与成本。

8. 维护成本低

耐大电流、抗高低温，故障率更低，结构更稳定，无明显副反应，长期运行可靠性高，基本免日常维护，适配车载启停、轨道交通、工业储能等长期运行场景，显著降低维护成本与停机损耗。

四、关键性能对比

性能指标	双电层电容器	混合型超级电容器	锂离子电池
储能机制	纯物理吸脱附	物理吸脱附+电化学反应	电化学嵌脱/氧化还原反应
功率密度	高（10-40kW/kg）	高（10-40kW/kg）	中（0.5-2kW/kg）
能量密度	低（5-12Wh/kg）	中（50-150Wh/kg）	高（150-400Wh/kg）
充放电时间	秒	分钟	小时
响应时间	毫秒	毫秒	秒
循环寿命	>100 万次	>10 万次	1000-5000 次
工作温度范围	-40℃～+65℃	-40℃～+55℃	-20℃～+60℃（低温衰减明显）
系统集成难度	极低	低	高（需复杂 BMS 均衡保护）