

钠离子电池应用场景及储能技术经济性分析

文/张华强
广东粤水电勘测设计有限公司

钠离子电池以较低的材料成本、较高的循环稳定性和良好的温度适应性，在大规模储能领域展现出独特优势。介绍了钠离子电池的技术原理及其相较于传统锂离子电池的优势，并结合已有研究和相关案例给出钠离子电池储能系统建设运行的经济性计算模型，分析多种电池的适用性和经济效益。

在探索可持续能源解决方案的过程中，储能技术发挥着不可或缺的作用。钠离子电池作为一种新兴的储能技术，因其成本效益高、资源丰富及环境友好等特性受到广泛关注。本文将探讨钠离子电池在各种储能应用场景中的功能，评估其技术经济性，并分析其在当前和未来能源系统中的应用前景，为储能技术选择和政策制定提供理论支持。

钠离子电池的储能优势与价值

钠离子电池在储能领域的优势主要体现在其独特的成本效益、持久的循环寿命、强大的深度放电能力、卓越的环境适应性和显著的环保特性。这种电池利用丰富且经济的钠材料，相比传统的储能电池在原材料成本上更具优势。这种优势不仅体现在制造过程中降低成本，而且在大规模储能应用中，能显著降低整体的投资和运维成本。此外，钠离子电池的循环寿命显著延长，提供了更长的使用周期，从而减少因电池性能衰退而导致的频繁更换需求。这种长期的稳定性对于需要持续、稳定能源供应的储能系统至关重要。再加上其出色的深度放电能力，几乎可以完全利用其标称容量，大幅提升了能源的有效利用率，使储能系统更加高效和实用。在适应不同环境的能力上，钠离子电池同样表现出

色。它们能够在广泛的温度范围内稳定运行，无论是极寒或是高温环境，都能保持良好的性能。这使得钠离子电池非常适合应用于多种不同的气候和地理条件，大大扩展其应用范围。钠离子电池在生产和回收过程中对环境的影响相对较小，这一点对于推动可持续发展尤为重要。相比于其他电池技术，钠离子电池的生态足迹较小，有助于减少能源存储对环境的总体影响。

钠离子电池储能的经济性分析

1. 储能电站电池系统成本模型

储能技术常采用平准化电力成本（LCOS）方法，以储能系统的放电电量为准。这种分析方法考虑不同储能技术的成本，特别是钠离子电池在储能电站中的应用。LCOS方法关注于电池系统的初始投资、运行维护成本以及电力损耗，以此来评估储能电站电池系统的度电成本。在建立储能电站电池系统的度电成本计算模型时，需全面考虑电池的运行特性和寿命特征。这包括但不限于电池的循环寿命、充放电效率、系统效率、容量衰减率以及典型运行模式下的能量转换损失。这些因素被纳入模型中，以确保计算出的度电成本能够全面反映出钠离子电池系统在储能电站中的实际成本情况。计算模

型为

$$\text{LCOE}_{\text{ESS}} = \frac{\text{总投资}}{\text{总上网电量}} = \frac{C_{\text{in}} + C_{\text{om}} + C_{\text{L}}}{E} \quad (1)$$

式中， LCOE_{ESS} 为电网储能系统中平准化全寿命的度电成本； C_{in} 为储能系统的初始投资成本； C_{om} 为储能系统的运行维护成本； C_{L} 为电力损耗的成本； E 为该系统全生命周期的上网电量。

钠离子应用储能系统的各项成本以及全生命周期的上网电量可表示为

$$\text{LCOE}_{\text{ESS}} = \frac{\frac{C_{\text{E}}E_{\text{n}}}{\eta_{\text{D}}\theta_{\text{DOD}}} + \frac{C_{\text{P}}E_{\text{n}}}{d} + \sum_{t=1}^T \left[\frac{\text{O \& M} \times C_{\text{E}}E_{\text{n}}}{(1+r)^t} + \left(\frac{1}{\eta_{\text{cyc}}} - 1 \right) \theta_{\text{DOD}} E_{\text{n}} P_{\text{c}} \sum_{t=1}^T \frac{n(t)}{(1+r)^t} \right]}{\sum_{t=1}^T \left[\eta_{\text{D}} \theta_{\text{DOD}} (1 - \theta_{\text{deg}}) E_{\text{n}} \frac{n(t)}{(1+r)^t} \right]} \quad (6)$$

式中， d 为钠离子储能系统在额定功率下的实际放电时间； C_{E} 为随容量变化而变化的装机成本； C_{P} 为随功率变化而变化的装机成本； E_{n} 为钠离子储能系统的额定装机容量； $n(t)$ 为第 t 年时系统的运行次数； $\text{O \& M}$ 为年均单位容量的实际运维成本与其单价的百分比； P_{c} 为在充电过程中的购电电价； r 为折现率； T 为系统的寿命； η_{cyc} 为钠离子储能系统实际循环效率； η_{D} 为钠离子储能系统实际放电效率； θ_{DOD} 为钠离子储能系统在运行过程中的充放电深度； θ_{deg} 为钠离子储能系统年平均衰退率。

2. 模型分析

目前，已建或在建的新型储能电站技术路线不同，为达到正常运行需求，其建设初期的超配容量、充放电深度、系统效率及年利用率等也不尽相同。

通过项目经验和调研，本文整理了不同电池体系的相关性能参数，不同电化学储能系统参数对比见表1。根据调研和文献公开数据，以铅蓄电池、磷酸铁锂电池、三元锂电池和钠离子电池储能为例，采用前述模型计算其在调峰应用场景下的全生命周期度电成本。

在现阶段，众多新建或正在建设中的储能电站采用各种不同的技术方案。这些方案在达到正常运行要求时，其初期的超额配置容量、充放电深度、系统效率和年度利用率等方面各有不同。对此，通过项目经验和深入调研，汇总不同电池体系的性能参数，对比各类电化学储能系统的数据并将其汇总（见表1）。再结合调研结果和公开的文献数据，

$$C_{\text{in}} = \frac{C_{\text{E}}E_{\text{n}}}{\eta_{\text{D}}\theta_{\text{DOD}}} + \frac{C_{\text{P}}E_{\text{n}}}{d} \quad (2)$$

$$C_{\text{om}} = \sum_{t=1}^T \frac{\text{O \& M} \times C_{\text{E}}E_{\text{n}}}{(1+r)^t} \quad (3)$$

$$C_{\text{L}} = \left(\frac{1}{\eta_{\text{cyc}}} - 1 \right) \theta_{\text{DOD}} E_{\text{n}} P_{\text{c}} \sum_{t=1}^T \frac{n(t)}{(1+r)^t} \quad (4)$$

$$E = \sum_{t=1}^T \left[\eta_{\text{D}} \theta_{\text{DOD}} (1 - \theta_{\text{deg}}) E_{\text{n}} \frac{n(t)}{(1+r)^t} \right] E \quad (5)$$

选取钠离子、三元锂、铅酸及磷酸铁锂4种电池当作储能示例，带入上述计算模型评估4种电池在调峰应用场景下的全生命周期度电成本，对比结果见表2。

表1 电化学储能系统参数

参数	钠离子 电池	三元锂 电池	铅蓄 电池	磷酸 铁锂
标称储能容量 E_{n} /(kW·h)	10 000	10 000	1 000	10 000
初始容量投资成本 C_{E} /[元/(kW·h)]	750~950	1 250~1 650	550~850	1 050~1 350
初始功率投资成本 C_{P} /(元/kW)	450~550	450~550	350~550	330~430
单位容量维护成本 $\text{O \& M}$ (%)	3.60	5.10	4.70	3.60
循环次数/次	4 000~5 000	2 500~3 000	3 700~4 200	4 000~6 000
折现率 r (%)	8	8	8	8
储能循环效率 η_{cyc} (%)	85~90	89~90	75~80	87~90
放电深度 θ_{DOD} (%)	100	100	70	90
年循环平均衰退率 θ_{deg} (%/a)	1.50	3.60	3.60	1.50
年运行次数 $n(t)$ /次	365	365	365	365
充电电价 P_{c} /[元/(kW·h)]	0.262	0.262	0.262	0.262

表2 4种电化学储能形式的全生命周期度电成本

项目	钠离子 电池	三元锂 电池	铅蓄 电池	磷酸 铁锂
不计电力损耗且折现率为0时的度电成本/元	0.320~0.365	0.810~0.970	0.639~0.816	0.459~0.533
计及电力损耗时的度电成本/元	0.522~0.580	1.060~1.280	0.940~1.224	0.729~0.863
不计电力损耗时的度电成本（弃风弃光消纳）/元	0.475~0.553	1.414~1.270	0.840~1.120	0.710~0.844

钠离子电池储能系统度电成本分析

在现阶段我国的储能系统投资成本组成中可以看出，初始容量的建设成本通常占据总投资的60%以上，其中半数以上的资金会被用于电芯的购置上。钠离子电池其正极材料组成多以Na、Cu、Fe和Mn元素为主，从成本角度来看，均属于价格低廉且存储量广泛的材料。同时，在制作过程中电池的负极还会使用无烟煤前驱体，其材料同样具有较为良好的经济性，并且其碳化温度相对较低，适合作为钠离子电池的负极材料。在集流体方面，因钠离子电池使用的是铝箔，而非铜箔，因此其价格可以降低约1/3。

从上述分析中能够看出，投资成本以及循环寿命是影响度电成本的主要因素，对此将对其进行进一步的分析，明确其对钠离子储能系统经济性影响的实际情况。假设储能系统的初始容量投资为550~750元/(kW·h)之间，实际设定循环次数为6 000周的条件下，钠离子电池储能系统的度电成本基本可以达到0.227~0.295元/(kW·h)；并且当系统的循环次数达到8 000周时，由钠离子电池支撑的储能系统实际度电成本可控制在0.2元/(kW·h)以下。

虽然钠离子电池的能量密度相对于锂离子电池略有不足，但在储能电站的应用中，这种差异被其他优势所抵消。尽管钠离子电池的使用可能会增加设备安装和用地成本，但它们在充放电循环中具有显著优势，因为它们不会受到过度放电的影响。钠离子电池的放电深度可以达到100%，意味着它们的实际可用容量几乎等同于标称容量。此外，钠离子电池具有较宽的温度适应范围，在充放电过程可以降低辅助能源消耗，进而提高整体效率。在整个生命周期内，通过电池结构和工艺的创新设计，钠离子电池可以有效降低制造成本、运维开支以及电池组替换费用。这些因素综合作用，有助于降低储能电站的整体度电成本，使钠离子电池成为一种经济高效的储能选择。

未来发展与挑战

1. 界面稳定性

界面稳定性是钠离子电池技术发展中的一个关键因素。在钠离子电池中，电极和电解液之间的界面对电池的性能和寿命有着直接影响。不稳定的界

面可能导致电池容量下降、内阻增加，甚至可能引起短路或失效。因此，研究和改进电极材料的表面性质，以及寻找更加稳定的电解液配方，是当前的研究热点。此外，界面上的化学反应可能产生副产物，这些副产物会影响离子的传输，因此对这些化学反应的研究和控制对于提高电池的整体性能和稳定性至关重要^[5]。

2. 安全问题

钠离子电池的安全性是另一个重要的考量因素，特别是在大规模储能应用中。由于电池在充放电过程中可能会遇到过热、短路甚至是物理损伤等情况，因此，提高电池的内在安全性成为一个关键挑战。这包括开发更为稳定的电解液、改进电池管理系统以及设计更为安全的电池结构等措施。此外，钠离子电池在极端条件下的表现，如高温或低温环境下的安全性能，也是重要的研究方向。开发先进的安全测试标准和协议，以确保在各种条件下电池的安全性，是实现钠离子电池广泛应用的前提。

结束语

综上所述，随着技术的进步和市场的成熟，钠离子电池在储能领域的应用前景广阔。虽然面临能量密度较低等技术挑战，但其低成本、高安全性和良好的环境适应性使其在大规模储能、分布式储能和特殊环境储能等多种场景下具有显著优势。未来，通过持续的材料创新、工艺优化和系统集成，钠离子电池有望实现更高的能量密度和更低的生命周期成本，进一步推动储能技术的发展和能源转型。为实现这一目标，需要跨学科合作、政策支持和市场引导，共同推进钠离子电池技术的商业化和可持续发展。EA

(收稿日期：2024-01-02)

参考文献

- [1] 缪平, 姚祯, LEMMON John, 等. 电池储能技术研究进展及展望[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 670-678.
- [2] 杨斌, 樊立萍, 高迎慧, 等. 超高功率密度锂离子电池放电性能及容量预估研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(11): 419-425.