

储能技术及应用

Energy Storage Technology and Application

李建林 徐少华 刘超群 等编著

游外译

TUOXIN



TUOXIN

TUOXIN

移动式方舱储能系统



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

储能技术及应用

李建林 徐少华 刘超群
靳文涛 杨水丽 胡娟
牛萌 吕洪章 李海峰 编著
程伟 杜笑天 侯小贺
李章溢 庞博

机械工业出版社

本书针对储能的国内外发展现状、制约因素、规模化应用技术路线和商业模式进行了研究,总结了国内外储能的应用现状、装机容量、各类储能的装机占比及近年来储能的增长趋势,对各类型储能的原理和研究现状及其在电力系统应用领域的适应性进行分析。同时分析了储能规模化推广亟需解决的关键技术,包括制约储能产业发展的技术因素、成本价格及政策补贴因素等。介绍了国内外现有的分布式光储、电力服务、电动汽车和动力电池梯次利用的商业模式,并对储能系统在西北电网中规模化应用的前景进行展望,给出了西北电网中相应储能示范工程的部署建议。

本书可供从事大规模新能源发电、储能技术和智能电网等领域相关研究人员参考使用,也可供高等院校广大师生借鉴参考。

图书在版编目(CIP)数据

储能技术及应用/李建林等编著. —北京:机械工业出版社, 2018.11

ISBN 978-7-111-61392-3

I. ①储… II. ①李… III. ①储能—技术—研究
IV. ①TK02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 261001 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:张万英 责任编辑:朱 历

责任校对:胡 颖 封面设计:侯媛媛

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2018 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

140mm×203mm·4.25 印张·109 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-61392-3

定价:58.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

储能即能量存储，是指通过一种介质或者设备，把一种能量形式用同一种或者转换成另一种能量形式存储起来，基于未来应用需要以特定能量形式释放出来的循环过程。根据国际能源署的研究，为满足新能源消纳需求，预测美国、欧洲、中国和印度到 2050 年将需要增加 310 GW 并网电力储存能力。麦肯锡的研究则认为到 2025 年储能技术将具有颠覆性作用，并对经济产生显著影响。世界许多国际组织和国家把发展储能作为缓解能源供应矛盾、应对气候变化的重要措施，并制定了发展战略，提出了 2030 年、2050 年明确的发展目标和相应的激励政策。近年来，中国新能源建设进入了快速发展阶段，但中国新能源资源富集区远离负荷中心，当地电网无法全部消纳。为了应对新能源发电快速发展给电网安全运行带来的挑战，可以通过大规模储能系统为电网提供灵活可靠的调度资源，改善新能源发电的间歇性和波动性，提高电网调峰调频能力，实现电网安全、稳定和经济运行。

本书针对储能的国内外发展现状、制约因素、规模化应用技术路线和商业模式进行了研究，主要内容如下：①总结了国内外储能的应用现状、装机容量、各类储能的装机占比及近年来储能的增长趋势，对各类型储能的原理和研究现状及其在电力系统应用领域的适应性进行了分析，并对国内外储能市场和政策环境进行了研究（相关数据截止时间为 2017 年底）；②分析了储能规模化推广亟需解决的关键技术，包括制约储能产业发展的技术因素、成本价格及政策补贴因素，对现有储能类型的成本进行了对比分析，得出各类储能到 2020 年的大概成本；③研究了各类储能未来发展的路线图，对 2020 年、2030 年储能技术的发展趋势、应用

情况进行了展望，并总结了国内外与储能相关的标准；④研究了国内外现有的分布式光储、电力服务、电动汽车和动力电池梯次利用的商业模式，给出了中国储能规模化应用的政策建议；⑤对储能系统在西北电网中规模化应用的前景进行了展望，并给出了西北电网中相应储能示范工程的部署建议。

本书共分为7章。

第1章调研了物理储能、电化学储能、储冷（热）和储氢等各类型储能的技术参数，对比分析了各类型储能技术成熟度，结合储能技术特性，研究了各类型储能技术在大规模新能源发电、微电网、分布式光储和调峰调频辅助服务等领域的适用性。该部分内容由刘超群、靳文涛、牛萌和吕洪章撰写整理。

第2章分别对规模化储能系统的多点布局、类型选择和容量优化配置技术，核心装备制造技术，储能站群的动态功率与能量管理技术，多运行目标下储能系统广域调度技术以及规模化储能工程化应用技术进行了归纳梳理。该部分内容由李建林和徐少华撰写整理。

第3章研究了储能参与可再生能源发电从本地应用向系统级应用、从单一功能走向多元化以及从功能性示范到需求导向型应用的发展路线，并根据当前电力体制改革发展方向，提出了储能应用趋势和应用技术发展路线图，同时基于储能不同应用领域及其关键应用技术，研究了储能应用技术标准化体系。该部分内容由胡娟、李海峰、庞博和吕洪章撰写整理。

第4章调研了国内外储能运行模式和商业模式研究现状，针对国内外典型商业模式的差异化，提出了储能规模化推广的商业模式；研究了在电力体制改革趋势下，能源供应模式和商业运行模式可能产生的变革；对储能市场化应用的敏感性因素进行了分析，提出了储能技术发展对外界政策和市场环境的需求。该部分内容由程伟、杜笑天和侯小贺撰写整理。

第5章介绍了新疆、甘肃和青海电网的可再生能源应用现状，

提出了储能系统参与系统调频调压、降低弃风弃光率的应用模式。基于实际电网情况对储能系统提高电网安全稳定运行进行仿真分析，并给出了具体的储能系统配置方案及投资效益。该部分内容由杨水丽撰写整理。

第 6 章分别对大规模储能集群提升西北可再生能源基地外送能力工程示范、百兆瓦级储能电站协调西北特高压通道能源输送工程示范、广域布局分布式储能提升西北网源—网—荷协调响应能力的工程示范、多布点大规模储能统一协调控制研究及提升西北电网辅助服务能力工程示范及储能电站融合新能源发电的虚拟同步发电机技术及示范提出部署建议。该部分内容由李章溢撰写整理。

第 7 章在上述研究分析的基础上，对全书进行了总结，并给出了推进储能产业发展的相关政策建议。

本书得到了国家重点研发计划“10 MW 级液流电池储能技术(2017YFB0903504)”、国家电网公司项目“分布式储能装置及用户侧优化配置关键技术研究及示范(DG71—17—003)”、山西省科技厅项目“10 MW 级锂电池储能系统关键技术及工程示范(201603D112001)”和中国电科院创新基金“用户侧分布式储能系统聚合控制策略研究(DG83—18—005)”的资助，深表谢意。同时，感谢国网新疆电力公司经济技术研究院宋新甫、国网青海省电力公司李绚绚以及甘肃省电力科学研究院王定美等相关同志的积极参与和配合。

编写本书的初衷是否果如所求，有待通过实践验证。限于作者水平，书中疏漏之处在所难免，尚祈读者不吝赐教。

目 录

前言

第 1 章 储能系统在区域电网中规模化应用需求分析	1
1.1 国内外储能应用现状及近期动向	1
1.2 储能技术发展现状及趋势分析	3
1.2.1 机械类储能	4
1.2.2 电气类储能	6
1.2.3 电化学类储能	10
1.2.4 热储能	19
1.2.5 氢储能	24
1.2.6 储能成本分析	25
1.3 储能系统在含大规模化能源基地电网中的应用需求分析	27
1.3.1 储能在发电领域的应用	27
1.3.2 储能在辅助服务领域的应用	28
1.3.3 储能在输配电领域的应用	29
1.3.4 储能在用户端的应用	30
1.3.5 储能在分布式发电与微电网的应用	31
1.3.6 储能在大规模可再生能源并网的应用	31
1.4 储能市场和政策环境	34
1.4.1 国内储能市场与相关政策环境	34
1.4.2 国外储能相关政策	38
1.4.3 价格机制与激励政策	40
第 2 章 储能规模化推广亟需解决的关键技术	42
2.1 规模化储能系统的核心装备制造技术	42

2.2	储能系统集成与工程化技术	43
2.3	储能站群的动态功率与能量管理技术	47
2.4	多运行目标下储能系统广域调度技术	47
第3章 储能规模化应用技术路线与经济性分析		50
3.1	储能应用技术发展路线图	50
3.1.1	物理储能	50
3.1.2	化学储能	51
3.1.3	氢能及燃料电池	52
3.1.4	储热技术	53
3.2	储能应用技术标准化体系	53
3.2.1	国内外储能标准现状	53
3.2.2	电力储能标准框架体系	59
第4章 商业模式与前景展望		62
4.1	国内外储能商业模式现状与建议	62
4.1.1	国际储能商业模式	62
4.1.2	国内现有储能商业模式现状	75
4.2	储能规模化应用相关建议	79
第5章 储能技术在送端电网中的应用分析		85
5.1	储能在新疆电网中规模化应用研究	85
5.1.1	新疆电网存在的问题	85
5.1.2	储能技术在新疆电网中规模化应用仿真分析	86
5.1.3	投资及效益估算	90
5.1.4	小结	91
5.2	储能在甘肃电网中规模化应用研究	91
5.2.1	甘肃电网存在的问题	91
5.2.2	储能技术在甘肃电网中规模化应用仿真分析	92
5.2.3	投资及效益估算	101
5.2.4	小结	102
5.3	储能在青海电网中规模化应用研究	103

5.3.1	青海电网存在的问题	103
5.3.2	储能技术在青海电网中规模化应用仿真分析	104
5.3.3	投资及效益估算	108
5.3.4	小结	109
5.4	储能技术在电网中的应用分析总结	110
5.4.1	储能在新疆电网中规模化应用研究	110
5.4.2	储能在甘肃电网中规模化应用研究	111
5.4.3	储能在青海电网中规模化应用研究	111
第6章	西北电网中建议部署的规模化储能示范工程	113
6.1	储能系统在西北地区应用场景分析	113
6.2	建议部署的示范工程	113
6.2.1	大规模储能集群提升西北可再生能源基地外送能力工程	113
6.2.2	百兆瓦级储能电站协调西北特高压通道能源输送工程	114
6.2.3	广域布局分布式储能提升西北网源—网—荷协调响应能力工程	115
6.2.4	大规模储能统一协调控制提升西北电网辅助服务能力工程	115
6.2.5	储能电站融合新能源发电的虚拟同步发电机技术示范	116
第7章	结论及建议	117
7.1	结论	117
7.2	建议	118
	参考文献	123

第 1 章 储能系统在区域电网中 规模化应用需求分析

1.1 国内外储能应用现状及近期动向

在可再生能源发电及智能电网技术的驱动下，近年来国内外开展了多种新型储能技术的研究探索，并建成了多项大规模储能示范工程。至 2017 年底，全球累计运行储能装机容量 175.72 GW，其中抽水蓄能 167.62 GW（占比 95.39%），电化学储能 3.69 GW（占比 2.1%），储热 2.81 GW（占比 1.6%），其他机械储能 1.58 GW（占比 0.9%），储氢 0.02 GW（占比 0.01%），具体如图 1-1 所示。

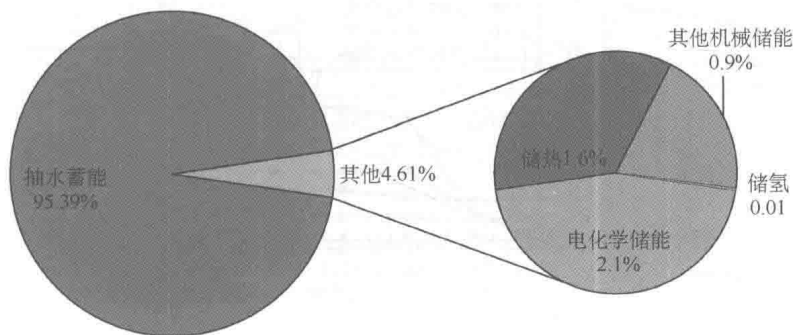


图 1-1 2017 年全球各储能项目类型装机情况

自 2010 年后各类型储能项目数逐年增长幅度以锂离子电池储能项目最大，如图 1-2a 所示。在电化学储能装机容量分析中，锂离子电池储能前期装机容量小，自 2011 年开始，其装机容量得到大幅提升，在电池储能中位列最高，如图 1-2b 所示。

从全球已有示范工程的功能应用上看，较多项目中储能应用于可再生能源并网领域，项目数占比为 39%；其次为输配电领域，

项目数占比为 31%；分布式能源与辅助服务的项目数占比分别为 18%和 12%，如图 1-3a 所示。储能技术在各应用领域的项目数逐年增长趋势如图 1-3b 所示。自 2011 年后，储能的用户侧分布式能源领域的应用呈现快速增长的趋势。

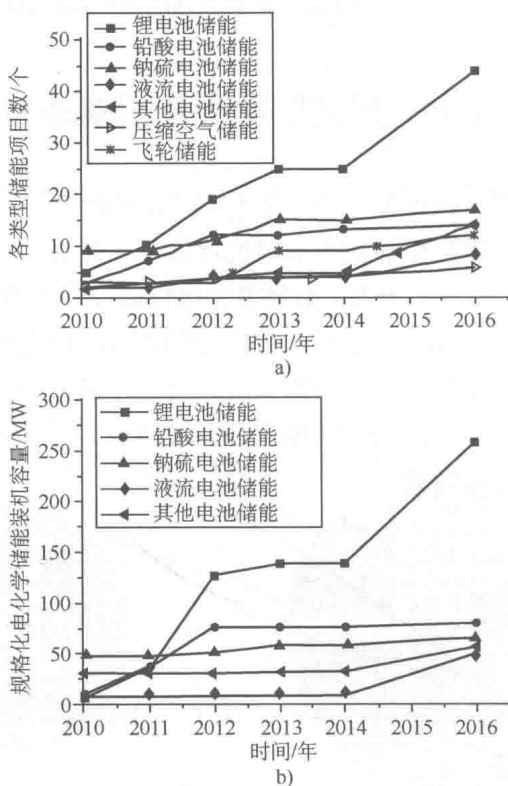


图 1-2 规模化各类型储能示范项目数与总装机增长趋势

a) 各类型储能项目数增长趋势 b) 各类型储能总装机增长趋势

由国外储能技术应用现状及近期动向分析可知，锂离子电池为当前最受关注的储能技术；大规模储能技术在可再生能源发电领域的应用，在项目数与装机容量上均处于快速增长的态势；储能技术在分布式发电与微电网领域的应用项目数量也有较快增长，并逐渐受到关注。

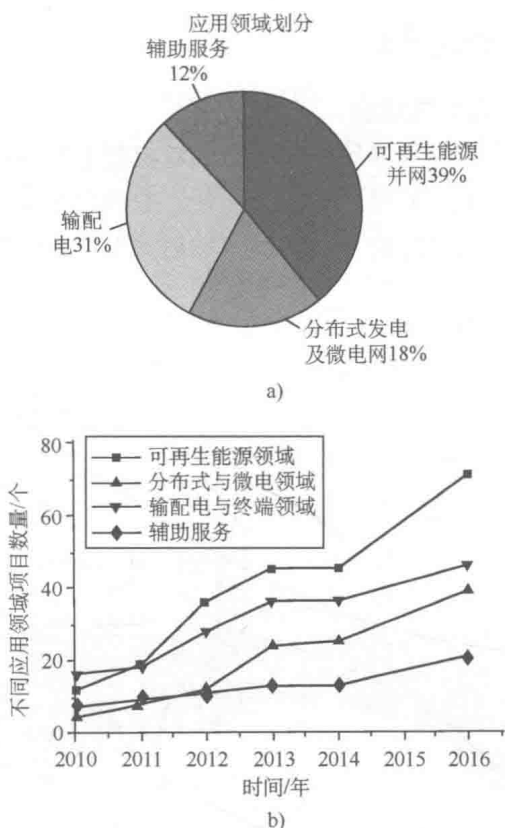


图 1-3 规模化储能在各应用领域中的项目数占比与增长趋势

a) 储能在各应用领域中项目数占比 b) 储能在各应用领域中项目数增长趋势

1.2 储能技术发展现状及趋势分析

按照储能载体技术类型，大规模储能技术可以分为机械类储能（抽水蓄能、压缩空气储能和飞轮储能等）、电气类储能（超导储能和电容储能等）、电化学储能（高温钠系电池、液流电池、铅蓄电池和锂离子电池等）以及热储能（显热储热技术、潜热储热技术、储冷技术和化学储热技术等）等。

1.2.1 机械类储能

1. 压缩空气储能

压缩空气储能系统是基于燃气轮机技术发展起来的一种能量存储系统，工作原理如图 1-4 所示。空气经压机压缩后，在燃烧室中利用燃料燃烧加热升温，然后高温高压燃气进入透平膨胀做功。

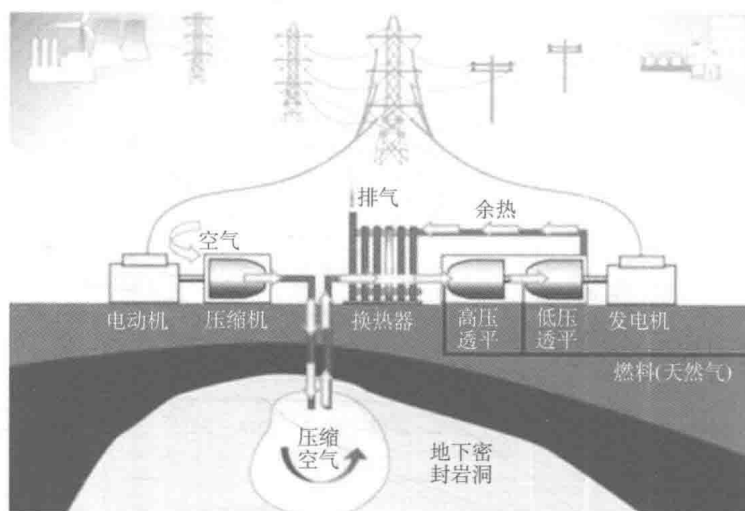


图 1-4 传统压缩空气储能原理示意图

近年来，国内外学者相继提出了带回热的压缩空气储能系统（AA-CAES）、液态压缩空气储能系统和超临界压缩空气储能系统等多种新型压缩空气储能技术，摆脱了对化石燃料和地下洞穴等资源条件的限制，不过目前基本还处于关键技术研究突破、实验室样机或小容量示范阶段。

传统使用化石燃料并利用地下洞穴的压缩空气储能规模可以达到数百兆瓦，效率可达 70%，建设成本 10000 元/kW。不依赖化石燃料和地理资源条件的新型压缩空气储能规模可达到数兆瓦

到数十兆瓦，但目前成本较高，效率也低于 60%。

目前世界上已有两座大规模压缩空气储能电站投入了商业运行。第一座是 1978 年投入商业运行的德国 Huntorf 电站，目前仍在运行中。机组的压缩机功率为 60 MW，释能输出功率为 290 MW，系统将压缩空气存储在地下 600 m 的废弃矿洞中，矿洞总容积达 $3.1 \times 10^5 \text{ m}^3$ ，压缩空气的压力最高可达 10 MPa。机组可连续充气 8 h，连续发电 2 h。冷启动至满负荷约需 6 min，在 25% 负荷时的热耗比满负荷高 211 kJ，其排放量仅是同容量燃气轮机机组的 1/3，但燃烧废气直接排入大气。该电站在 1979—1991 年期间共启动并网 5000 多次，平均可用率 86.3%，容量系数平均为 33.0%~46.9%。

第二座是于 1991 年投入商业运行的美国阿拉巴马州的 McIntosh 压缩空气储能电站。其储气洞穴在地下 450 m，总容积为 $5.6 \times 10^5 \text{ m}^3$ ，压缩空气储气压力为 7.5 MPa。该储能电站压缩机组功率为 50 MW，发电功率为 110 MW，可以实现连续 41 h 空气压缩和 26 h 发电，机组从启动到满负荷约需 9 min。该机组增加了回热器用于吸收余热，以提高系统效率。该电站由阿拉巴马州电力公司的能源控制中心进行远距离自动控制。

另外，日本、意大利和以色列等国也分别有压缩空气储能电站正在建设。而俄罗斯、法国、南非、卢森堡、韩国和英国也都在进行实验室研究。中国压缩空气储能技术研究起步较晚，目前尚无商业运行的压缩空气储能电站。中国科学院工程热物理研究所在国际上首次提出并自主研发出超临界压缩空气储能系统，并已建成 1.5 MW 超临界压缩空气储能示范系统。2014 年 11 月 11 日，由中国科学院、清华大学、江苏太阳宝新能源有限公司和上海电气联合承建的安徽芜湖热储能+压缩空气储能发电示范工程试运行首次成功发电。该项目是国家电网智能化示范项目，装机规模为 500 kW，建设的目的是为了验证热储能+压缩空气混合储能系统的整体效率和实际运行效果，通过示范项目的运行为

日后建设大规模储能项目积累经验。

2. 飞轮储能

飞轮储能结构如图 1-5 所示。飞轮储能具有功率密度高、使用寿命长和对环境友好等优点，其缺点主要是储能密度低和自放电率较高，目前主要用于改善电能质量、不间断电源等应用场合。近年来，国际上飞轮储能技术的开发和应用研究十分活跃，其中美国投资最多，规模最大，进展最快。国内从事飞轮研究的单位主要有北京航空航天大学 and 清华大学等。这两家大学合作，正在研发采用电磁轴承的飞轮储能系统，该系统采用高强度玻璃纤维/碳纤维多层复合材料的轮缘—高强度金属的轮毂、永磁直流无刷电动机/发电机、永磁悬吊式上阻尼、动压油膜螺旋槽轴承、挤压油膜下阻尼和真空密封。

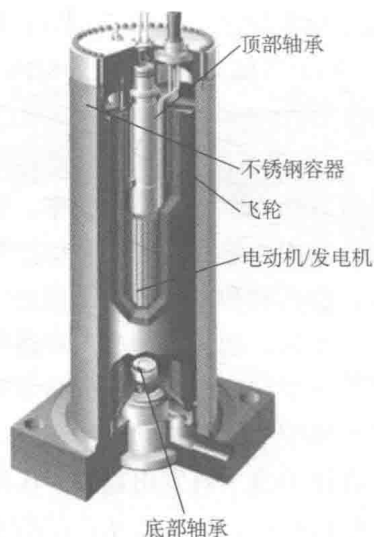


图 1-5 飞轮储能结构示意图

1.2.2 电气类储能

1. 超级电容器储能

超级电容器储能本质上是以电磁场来储存能量的，不存在

能量形态的转换过程，具有效率高、响应速度快和循环使用寿命长等优点，适合在提高电能质量等场合应用。美国、日本、俄罗斯和韩国等国家凭借多年的超级电容器研究开发和技术积累，目前处于领先地位。具有代表性的单位包括美国 Maxwell 公司、日本 NEC 公司和俄罗斯的 Econd 公司等，这些公司目前占据着全球大部分市场。近年来，中国也逐渐开始重视超级电容器技术，上海交通大学、中国人民解放军总装备部防化研究院和成都电子科技大学等都开展了超级电容器的基础研究和器件研制工作。国内从事大容量超级电容器研发的厂家（如锦州锦荣公司、北京集星公司和上海奥威公司等）已具备一定的技术实力和产业化能力。

超级电容器分为双电层电容器和电化学电容器两大类。其中，双电层电容器的应用最为广泛，它采用高比表面积活性炭作为电极材料，通过炭电极与电解液的固液相界面上的电荷分离而产生双电层电容，其原理如图 1-6 所示。在充放电时发生的是电极/电解液界面的电荷吸附、脱附过程，而不是电化学反应。电化学电容器采用 RuO_2 等贵金属氧化物作电极，在氧化物电极表面及体相发生氧化—还原反应而产生吸附电容，又称为法拉第准电容。

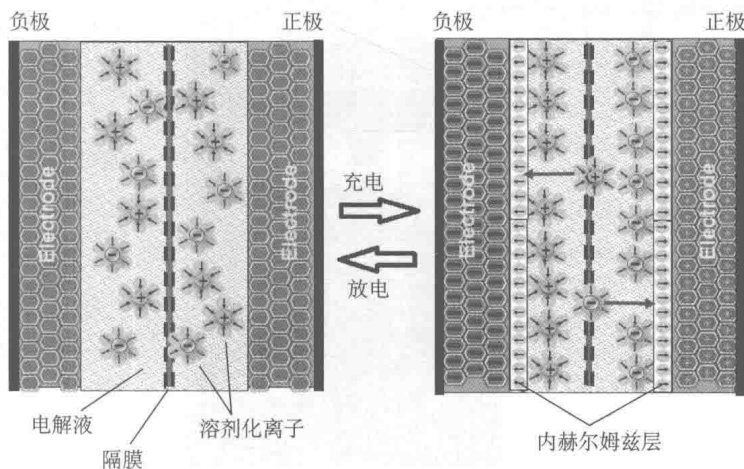


图 1-6 双电层电容器原理图

由于法拉第准电容的产生机理与电池反应相似，在相同电极面积的情况下，其电容量是双电层电容的几倍，但双电层电容器瞬间大电流放电的功率特性比法拉第电容器好。目前双电层超级电容器的成本较高，约为 500~1500 元/kW、1500~12000 元/kW·h，循环寿命达到 10 万次以上，能量转换效率大于 80%。

近年来，中国在浙江舟山、南麓岛的微电网示范工程中分别采用了 200 kW、1000 kW 超级电容器作为其中一种储能方式，由于超级电容器能量密度低，所以在其中的作用仅限于平抑风光波动。目前亚洲最大的超级电容器应用项目是上海洋山深水港项目，洋山深水港的 23 台港口起重机的每次用电会让局部电网发生 10~15 s 的电压波动，采用美国 Maxwell 公司的额定功率 3 MW 的超级电容器模块，工作时间 20 s 对电压波动起到缓冲作用，从而最大限度地降低对电网的影响。

2. 超导储能

超导磁储能（Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES）系统利用超导线圈通过变流器将电网能量以电磁能的形式储存起来，需要时再通过变流器馈送给电网或其他装置。超导混合磁体如图 1-7 所示。

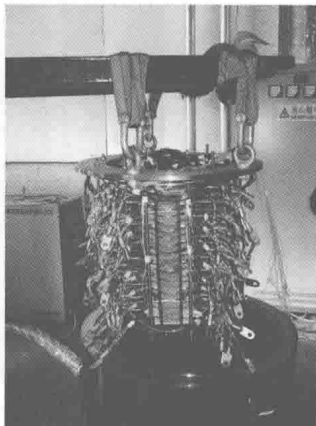


图 1-7 中国电力科学研究院研制的超导混合磁体