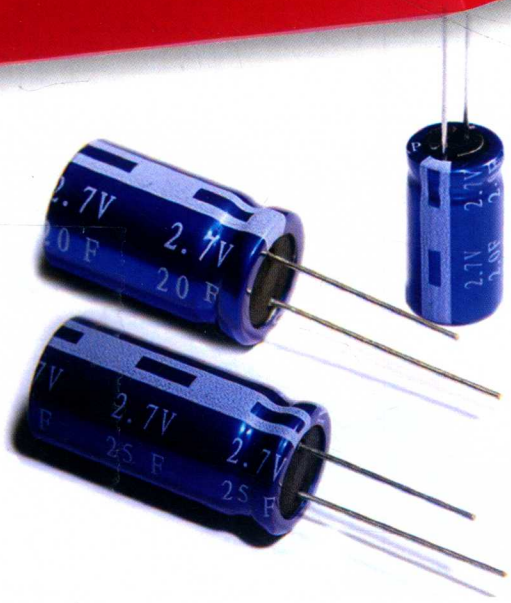
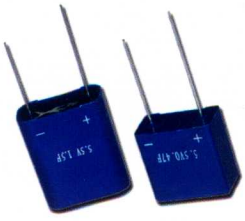
超级电容器
及其在储能系统中的应用

王凯 李立伟 黄一诺 编著





机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

超级电容器及其在储能系统中的应用

王　凯　李立伟　黄一诺　编著

机 械 工 业 出 版 社

本书重点分析了超级电容器及其在储能系统中的应用。全书共分为7章，第1章介绍了超级电容器的研究背景、分类和应用前景。第2章为电极材料的制备和性能研究，主要介绍了稀释法和模板法。第3章为电解质结构与材料，主要包括电解液概述、水电解质、有机电解质、离子液体和固态聚合物电解质。第4章为超级电容器结构设计及其储能特性研究，主要包括堆叠式超级电容器、卷绕式超级电容器和混合型超级电容器。第5章为超级电容器的热行为研究，主要包括堆叠式超级电容器的热行为研究、卷绕式超级电容器的热行为研究和混合型超级电容器的热行为研究。第6章为超级电容器测试系统的研究，主要包括恒流测试和恒压测试。第7章为超级电容器的健康管理。

本书可作为从事储能系统研究的技术人员的参考用书，也可作为电气信息类高年级本科或者研究生的教材。

图书在版编目（CIP）数据

超级电容器及其在储能系统中的应用/王凯，李立伟，黄一诺编著. —北京：机械工业出版社，2019.12

ISBN 978-7-111-64394-4

Ⅰ.①超… Ⅱ.①王… ②李… ③黄… Ⅲ.①电容器-研究 Ⅳ.①TM53

中国版本图书馆CIP数据核字（2019）第276376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：罗 莉 责任编辑：罗 莉

责任校对：刘雅娜 封面设计：陈 沛

责任印制：张 博

三河市国英印务有限公司印刷

2020年3月第1版第1次印刷

169mm×239mm · 8.5印张 · 174千字

0001—1900册

标准书号：ISBN 978-7-111-64394-4

定价：49.80元

电话服务

客服电话：010-88361066

010-88379833

010-68326294

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

机工教育服务网：www.cmpedu.com

封底无防伪标均为盗版

前　言

超级电容器又称电化学电容器，是非常理想的能源存储设备，因其具有功率密度高、循环寿命长和使用温度范围宽等显著优势，已成为化学电源产业内新的亮点。作为一种大功率储能元件，超级电容器在轨道交通、现代通信、航空航天、国防等领域具有广泛的应用前景，全球需求量迅速增长。

超级电容器是从20世纪七八十年代发展起来的通过极化电解质来储能的一种电化学元件。超级电容器作为一种具有应用前景的新型储能装置，在国外已有相当多的公司或机构在从事这方面的研究与创新，有部分公司还实现了产品的商业化。目前，日本、美国、俄罗斯等在这方面处于领先地位，几乎占据了整个超级电容器市场。美、日、韩及欧洲等对超级电容器的应用进行了卓有成效的研究。这些国家和地区的超级电容器产品在质量、功率、价格等方面各有自己的特点和优势。另外，澳大利亚、印度以及欧洲的许多国家也在超级电容器的研发和产业化方面开展了大量的工作。

我国超级电容器的研究起步于20世纪80年代，目前国内对使用各种活性炭作为电极材料的超级电容器已经进行了一定的研究，并且有了商业应用。目前从发展状况来看，我国非常重视超级电容器的发展，在国家高技术研究发展计划（863计划）中的电动汽车重大专项，把超级电容器作为一个重点项目进行研究开发。超级电容器在我国经历了从无到有、从小到大的发展过程，本书对超级电容器及其在储能系统中的应用进行一次全面的归纳和系统的总结。

本书重点分析了超级电容器及其在储能系统中的应用。全书共分为7章，第1章为超级电容器的研究背景、分类和应用前景。第2章为电极材料的制备和性能研究，主要包括稀释法和模板法。第3章为电解质结构与材料，主要包括电解液概述、水电解质、有机电解质、离子液体和固态聚合物电解质。第4章为超级电容器结构设计及其储能特性研究，主要包括堆叠式超级电容器、卷绕式超级电容器和混合型超级电容器。第5章为超级电容器的热行为研究，主要包括堆叠式超级电容器的热行为研究、卷绕式超级电容器的热行为研究和混合型超级电容器的热行为研究。第6章为超

级电容器测试系统的研究，主要包括恒流测试和恒压测试。第7章为超级电容器的健康管理。

编者在此对书末所列参考文献的作者表示衷心感谢。

编者殷切希望使用本书的教师、同学和专业技术人员，对本书的内容、结构及疏漏、错误之处给予批评指正。

编　者

目　录

前　言

第 1 章　概述 …… 1

1.1　超级电容器的研究背景 …… 1

1.2　超级电容器的分类 …… 7

1.3　超级电容器的应用前景 …… 8

第 2 章　电极材料的制备和性能研究 …… 13

2.1　引言 …… 13

2.2　稀释法制备氢氧化镍 …… 13

2.2.1　氢氧化镍的制备 …… 13

2.2.2　电极制备和性能测试 …… 15

2.2.3　实验结果与讨论 …… 15

2.3　稀释法制备氧化镍 …… 17

2.3.1　氧化镍的制备 …… 17

2.3.2　电极制备和性能测试 …… 18

2.3.3　实验结果与讨论 …… 18

2.4　模板法制备有序介孔炭 …… 20

2.4.1　有序介孔炭的制备 …… 21

2.4.2　电极制备和性能测试 …… 21

2.4.3　实验结果与讨论 …… 21

第 3 章　电解质结构与材料 …… 25

3.1　引言 …… 25

3.2　电解液概述 …… 25

3.3　水电解质 …… 27

3.4　有机电解质 …… 28

3.5　离子液体 …… 29

3.6　固态聚合物电解质 …… 30

第 4 章　超级电容器结构设计及其储能特性研究 …… 32

4.1　引言 …… 32

4.2　堆叠式超级电容器 …… 32

4.2.1　堆叠式超级电容器设计 …… 33

4.2.2　堆叠式超级电容器储能特性研究 …… 35

4.3　卷绕式超级电容器 …… 39

4.3.1　卷绕式超级电容器设计 …… 39

4.3.2　卷绕式超级电容器储能特性研究 …… 40

4.4　混合型超级电容器 …… 45

4.4.1　混合型超级电容器的结构确定 …… 45

4.4.2　混合型超级电容器性能测试 …… 46

第 5 章　超级电容器的热行为研究 …… 48

5.1　引言 …… 48

5.2　堆叠式超级电容器的热行为研究 …… 48

5.2.1　堆叠式超级电容器有限元建模 …… 48

5.2.2　堆叠式超级电容器热行为分析 …… 50

5.2.3　堆叠式超级电容器热行为研究的结果与讨论 …… 52

5.3　卷绕式超级电容器的热行为研究 …… 55

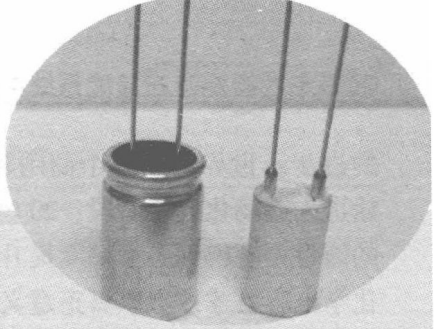
5.3.1　卷绕式超级电容器有限元建模 …… 55

5.3.2　卷绕式超级电容器热行为分析 …… 56

5.3.3　卷绕式超级电容器热行为研究的结果与讨论 …… 59

5.4　混合型超级电容器的热行为研究 …… 62

5.4.1 传热模型 …… 62
5.4.2 传热分析与讨论 …… 63
第6章 超级电容器测试系统的研究 …… 67
6.1 引言 …… 67
6.2 测试系统总体设计 …… 67
6.3 测试系统硬件设计 …… 70
6.3.1 控制芯片的选择 …… 70
6.3.2 IGBT 和继电器驱动电路 …… 71
6.3.3 采样电路设计 …… 72
6.3.4 通信模块设计 …… 75
6.3.5 数据存储模块设计 …… 75
6.3.6 抗干扰设计 …… 76
6.4 测试系统软件设计 …… 76
6.5 实验测试与结果 …… 79
6.5.1 软件测试 …… 79
6.5.2 硬件测试 …… 80
6.5.3 超级电容器恒流充放电实验验证 …… 81
6.6 串联超级电容器组电压均衡系统的研究 …… 82
6.6.1 电压均衡系统的总体设计 … 84
6.6.2 电压均衡主电路设计 …… 84
6.6.3 算法设计 …… 85
6.6.4 电压均衡系统的硬件设计 … 86
6.6.5 电压采集及信号调理电路 … 87
6.6.6 模拟开关电路 …… 89
6.6.7 PIC 单片机及 A/D 转换 …… 90
6.6.8 MOSFET 驱动电路…… 92
6.7 电压均衡系统的软件设计 …… 93
6.8 实验测试与结果分析 …… 96
6.8.1 测试实例 1 …… 96
6.8.2 测试实例 2 …… 96
第7章 超级电容器的健康管理…… 99
7.1 SOH 相关概念及理解 …… 99
7.2 基于模型的预测方法 …… 103
7.2.1 等效电路模型 …… 103
7.2.2 退化机理模型 …… 107
7.2.3 应用实例 …… 113
7.2.4 其他预测方法 …… 122
参考文献 …… 125



第1章 概 述

受经济发展和人口增长的影响，一次能源消费量不断增加，随着经济规模的不断增大，能源消费量持续增长。全球变暖和化石燃料的日益枯竭迫使人们大力发展可持续和可再生能源，目前，解决日趋短缺的能源问题，仍是人类面临的巨大挑战之一。因此，学者们纷纷投身新能源领域，在寻找清洁、高效和可再生能源的同时，也积极关注能量存储。太阳能和风能作为最具有发展前景的新能源引起了学者们极大的兴趣，并得到了快速发展，然而这些能源并不稳定，如太阳能在夜晚不能工作，到达地球表面的太阳辐射的总量尽管很大，但是能流密度很低，受到昼夜、季节、地理纬度和海拔等自然条件的限制以及晴、阴、云、雨等随机因素的影响，所以，到达某一地面的太阳辐照度既是间断的，又是极不稳定的，效率低和成本高；风能的提供也存在不确定性，许多地区的风力有间歇性，风速不稳定，产生的能量大小不稳定，风力发电需要大量土地兴建风力发电场，进行风力发电时，风力发电机会发出巨大的噪声，因此需要储能系统对能量进行存储后再加以利用。随着石油资源日趋短缺，以及燃烧石油的内燃机尾气排放对环境的污染越来越严重（尤其是在大、中城市），人们都在研究替代内燃机的新型能源装置。目前针对混合动力、燃料电池、化学电池产品及应用的研究与开发，已经取得了一定的成效。但是由于它们固有的使用寿命短、温度特性差、化学电池环境污染严重、系统复杂、造价高昂等致命弱点，一直没有很好的解决办法。而超级电容器以其优异的特性扬长避短，可以部分或全部替代传统的化学电池用于车辆的牵引电源和起动能源，并且具有比传统的化学电池更加广泛的用途。近几年，超级电容器作为储能元件扮演越来越重要的角色，随着信息技术、电子产品和车用能源等领域中新技术的迅速发展，人们更加关注超级电容器的研究与开发。正因为如此，世界各国（特别是西方发达国家）都不遗余力地对超级电容器进行研究与开发[1]。

1.1 超级电容器的研究背景

从19世纪70年代至今，超级电容器的发展历经了很多重要的历程：20世纪50年代末，有科学家提议把由金属片构成的双层电化学电容器替换成由多空碳材料构成的电容器，并得到了实践的证明，换句话说，此时电化学电容器得到了飞速

的进步；世界上第一个商用超级电容器于1971年问世，这标志着超级电容器已经开始进入市场化运作阶段；20世纪80年代，由于引入了赝电容电极材料，超级电容器的能量密度得到了大幅度提升，达到了之前从未达到过的法拉级别，至此，所谓的电化学电容器才被冠以真正意义上的超级电容器之名；20世纪90年代，超级电容器的发展前景被西方发达国家看重，他们纷纷提出了与之相关的重大项目。

1879年，Helmholz发现了双层电容性质，提出了双电层的概念，但是双电层超级电容器用于能量存储仅仅是近几十年的事情。1957年，Becker（美国通用公司，General Electric Co.，GE）提出了将接近电池比容的电容器作为储能元件。1968年，Sohio（美国标准石油公司，The Standard Oil Company）利用高比表面积炭材料制作了双电层电容器。1978年，日本大阪公司生产金电容，这种产品是最早商业化和批量生产的碳双电层电容器。1979年，日本电气股份有限公司（Nippon Electric Company，Limited）开始生产超级电容器，并将其用于电动汽车的起动系统。1980年，日本松下公司（Panasonic Corporation）研究了以活性炭为电极材料，以有机溶液为电解质的超级电容器。在此之后，超级电容器开始大规模产业化。1981年，美国得州大学奥斯汀分校（University of Texas at Austin）研制了一种新型超级电容器，可在不到1ms的时间内完成充电。1982年，新加坡国立大学（National University of Singapore，NUS）纳米科技研究所宣称开发出一种能够储能的隔膜，不需要电解液，从而避免超级电容器的漏液损坏，不仅降低了成本，还能够储存更多的能量。1995年，日本日产公司（Nissan Motor Company，Itd.）利用新型超级电容器进一步提升电池充电效率，10min能够将一辆电动汽车的电池充满。超级电容器在国外起步较早，美国、德国、日本和俄罗斯等国凭借多年的研究开发和技术积累，目前在世界上属于前列。美国《探索》杂志曾将超级电容器列为2006年世界七大科技发现之一，并将超级电容器的出现视为能量储存领域中一项革命性的突破。在一些需要高功率和高效率解决方案的设计中，工程师已开始采用超级电容器来取代传统的电池。

我国对超级电容器的研究起始于20世纪80年代初。目前，国内生产厂家大多以生产双电层电容器为主，如锦州凯美能源有限公司（辽宁锦州）、长沙巨力电子科技有限公司（湖南长沙）、集盛星泰新能源科技有限公司（江苏常州），天津力神电池股份有限公司（天津滨海新区）、锦州富辰超级电容器有限责任公司（辽宁锦州）和锦州锦容超级电容器有限责任公司（辽宁锦州）等。这些公司将研究重点主要集中在大功率应用产品的开发，据相关统计，国产超级电容器在我国市场的占有份额已达到60%～70%。我国一些高等学校和科研院所，如香港科技大学、北京理工大学、苏州大学、南京理工大学、同济大学、上海交通大学和大连理工大学等都开展了对超级电容器电极材料、电解液和封装工艺的研究工作。

表1-1是3种常用储能装置的性能比较。由表可知，超级电容器是一种同时具有蓄电池和静电电容器的诸多优点的储能装置。

表 1-1 3 种常用储能装置的性能比较

性能参数	静电电容器	超级电容器	蓄电池
放电时间	10^{-6} ~ 10^{-3}s	1 ~ 30s	0.3 ~ 3h
充电时间	10^{-6} ~ 10^{-3}s	1 ~ 30s	1 ~ 5h
能量密度	<0.1W · h/kg	1 ~ 10W · h/kg	20 ~ 180W · h/kg
功率密度	>10000W/kg	1000 ~ 2000W/kg	50 ~ 300W/kg
循环寿命	几乎无限	>100000 次	500 ~ 2000 次

1. 超级电容器的优点

(1) 电容量高：超级电容器的容量最高可达到数千法拉，比同体积钽电解电容器、铝电解电容器的容量高数千倍。

(2) 循环寿命长：超级电容器充放电过程根据其储能机理分为两种：一种情况是双电层物理过程，即充放电过程只有离子或电荷的转移，没有发生化学或电化学反应而引发电极相变；另外一种情况是电化学反应过程，这种反应过程具有良好的可逆性，不容易出现活性物质的晶型转变、脱落等影响使用寿命的现象。总而言之，无论发生的是上述哪种过程，超级电容器的电容量衰减很少，循环使用次数可达数十万次，是蓄电池循环使用次数的 5 ~ 20 倍。

(3) 充电时间短：超级电容器采用大电流进行充电，能够在几秒到几分钟的时间内快速充满，而蓄电池即使快速充电也需要几十分钟，并且经常快速充电还会影响使用寿命。

(4) 高功率密度和高能量密度：超级电容器提供 1000 ~ 2000W/kg 功率密度的同时，还可以输出 1 ~ 10W · h/kg 的能量密度。由于这个原因，超级电容器适合应用在短时高功率输出的场合。超级电容器与蓄电池系统混合使用能形成一种既具有高功率密度又具有高能量密度的储能系统。

(5) 工作温度范围宽：超级电容器工作温度范围为 -40 ~ 70℃，而一般电池的温度范围在 -10 ~ 50℃之间。

(6) 运行可靠，免维护和环境友好：超级电容器有一定的抗过充能力，短时间内对其工作不会有太大影响，可保证系统运行的可靠性。

2. 超级电容器的缺点

(1) 单体工作电压低：水系电解液超级电容器单体的工作电压一般为 0 ~ 1.0V。超级电容器高输出电压是通过多个单体电容器串联实现的，并且要求串联电容器单体具有很好的一致性。非水系电解液超级电容器单体的工作电压可达 3.5V，但实际使用过程中最高只有 3.0V，同时非水系电解质纯度要求高，需要在无水、真空等装配环境下进行生产。

(2) 可能出现泄漏：超级电容器使用的材料虽然安全无害，但是如果安装位

置不合理，仍然会出现电解质泄漏问题，影响超级电容器的正常性能。

（3）超级电容器一般应用在直流条件下，不适合应用在交流场合。

（4）价格较高：超级电容器的成本远高于普通电容器。

超级电容器是介于传统电容器和电池之间的一种新型储能装置，其容量可达几百至上千法拉。与传统电容器相比，它具有较大的容量、较高的能量、较宽的工作温度范围和极长的使用寿命；而与蓄电池相比，它又具有较高的功率密度，且对环境无污染。因此，超级电容器是一种高效、实用、环保的能量存储装置。几种能量存储装置的性能比较见表 1-2。

表 1-2　几种能量存储装置性能比较

元器件	能量密度/(W·h/kg)	功率密度/(W/kg)	充放电次数/次
普通电容器	<0.2	$10^4 \sim 10^6$	$>10^6$
超级电容器	0.2～20	$10^2 \sim 10^4$	$>10^5$
充电电池	20～200	<500	$<10^4$

目前，对超级电容器性能描述的指标有：

1）额定容量：指按规定的恒定电流（如 1000F 以上的超级电容器规定的充电电流为 100A，200F 以下的为 3A）充电到额定电压后保持 2～3min，在规定的恒定电流放电条件下放电到端电压为零所需的时间与电流的乘积再除以额定电压值，单位为法拉（F）。

2）额定电压：即可以使用的最高安全端电压。击穿电压，其值远高于额定电压，约为额定电压的 1.5～3 倍，单位为伏特（V）。

3）额定电流：指 5s 内放电到额定电压一半的电流，单位为安培（A）。

4）最大存储能量：指额定电压下放电到零所释放的能量，单位为焦耳（J）或瓦时（W·h）。

5）能量密度：也称比能量。指单位质量或单位体积的电容器所给出的能量，单位为 W·h/kg 或 W·h/L。

6）功率密度：也称比功率。指单位质量或单位体积的超级电容器在匹配负荷下产生电/热效应各半时的放电功率。它表征超级电容器所能承受电流的能力，单位为 kW/kg 或 kW/L。

7）等效串联电阻（Equivalent Series Resistance，ESR）：其值与超级电容器电解液和电极材料、制备工艺等因素有关。通常交流 ESR 比直流 ESR 小，且随温度上升而减小。单位为欧姆（Ω）。

8）漏电流：指超级电容器保持静态储能状态时，内部等效并联阻抗导致的静态损耗，通常为加额定电压 72h 后测得的电流，单位为安培（A）。

9）使用寿命：是指超级电容器的电容量低于额定容量的 20% 或 ESR 增大到额定值的 1.5 倍时的时间长度。

10）循环寿命：超级电容器经历1次充电和放电，称为1次循环或叫1个周期。超级电容器的循环寿命很长，可达10万次以上。

在超级电容器的研制上，目前主要倾向于液体电解质双电层电容器和复合电极材料/导电聚合物电化学超级电容器。国外超级电容器的发展情况见表1-3。

表1-3 国外超级电容器的发展情况

公司名称	国家	技术基础	电解质	结 构	规 格
Powerstor	美国	凝胶碳	有机	卷绕式	3～5V，7.5F
Skeleton	美国	纳米碳	有机	预烧结碳-金属复合物	3～5V，250F
Maxwell	美国	复合碳纤维	有机	铝箔、碳布	3V，1000～2700F
Superfarad	瑞典	复合碳纤维	有机	碳布+粘合剂、多单元	40V，250F
Cap-xx	澳大利亚	复合碳颗粒	有机	卷绕式、碳颗粒+粘合剂	3V，120F
ELIT	俄罗斯	复合碳颗粒	硫酸	双极式、多单元	450F，0.5F
NEC	日本	复合碳颗粒	水系	碳布+粘合剂、多单元	5～11V，1～2F
Panasonic	日本	复合碳颗粒	有机	卷绕式、碳颗粒+粘合剂	3V，800～2000F
SAFT	法国	复合碳颗粒	有机	卷绕式、碳颗粒+粘合剂	3V，130F
Los Alamos Lab	美国	导电聚合物薄膜	有机	单一单元、导聚合物薄膜PFPT+碳纸	2.8V，0.8F
ESMA	俄罗斯	混合材料	氢氧化钾	多单元、碳+氧化镍	1.7V，50000F
Evans	美国	混合材料	硫酸	单一单元、氧化钌+锂箔	28V，0.02F
Pinnacle	美国	混合金属氧化物	硫酸	双极式、多元化、氧化钌+锂箔	15V，125F
US Armv	美国	混合金属氧化物	硫酸	双极式、多元化、含水氧化钌	5V，1F

在超级电容器的产业化上，最早是1980年NEC、TOKIN公司的产品与1987年松下、三菱公司。这些电容器标称电压为2.3～6V，年产量数百万只。20世纪90年代，俄罗斯ECOND公司和ELIT生产了SC牌电化学电容器，其标称电压为12～450V，电容从1 F至几百F，适合于需要大功率起动动力的场合。总的来说，当前美国、日本、俄罗斯的产品几乎占据了整个超级电容器市场，实现产业化的超级电容器基本上都是双电层电容器。一些双电层超级电容器产品的部分性能参数列于表1-4。

表1-4 双电层超级电容器产品的部分性能参数

公司名称	电极材料	电解液	能量密度/(W·h/kg)	功率密度/(W/kg)
FY	碳	H_2SO_4	0.33	—
FE	碳	H_2SO_4	0.01	—
Panasonic	碳	有机溶液	2.2	400
Evans	碳	H_2SO_4	0.2	—
Maxwell-Aubum	复合碳/金属	KOH	1.2	800
Maxwell-Aubum	复合碳/金属	有机溶液	7	2000
Livemore National Laboratory	碳气凝胶	KOH	1	—
Sandia National Laboratory	碳（合成）	水溶液	1.4	1000

在我国，北京有色金属研究总院、锦州电力电容器有限责任公司、北京科技大学、北京化工大学、北京理工大学、北京金正平科技有限公司、陆军防化学院、哈尔滨巨容新能源有限公司、上海奥威科技开发有限公司等正在开展超级电容器的研究。2005 年，由中国科学院电工所承担的 863 项目“可再生能源发电用超级电容器储能系统关键技术研究”通过专家验收。该项目完成了用于光伏发电系统的 300W · h/kW 超级电容器储能系统的研究开发工作。另外，华北电力大学等有关课题组，正在研究将超级电容器储能（Supercapacitor Energy Storge System，SESS）系统应用到分布式发电系统的配电网。但从整体来看，我国在超级电容器领域的研究与应用水平明显落后于世界先进水平[2]。

在超级电容器的使用中，应注意以下问题：①超级电容器具有固定的极性，在使用前应确认极性；②超级电容器应在标称电压下使用。因为当电容器电压超过标称电压时会导致电解液分解，同时电容器会发热，容量下降，内阻增加，使其寿命缩短；③由于 ESR 的存在，超级电容器不可应用于高频率充放电的电路中；④当对超级电容器进行串联使用时，存在单体间的电压均衡问题，单纯的串联会导致某个或几个单体电容器因过电压而损坏，从而影响其整体性能。

随着电力系统的发展，分布式发电技术越来越受到重视。储能系统作为分布式发电系统必要的能量缓冲环节，因而其作用越来越重要。超级电容器储能系统利用多组超级电容器将能量以电场能的形式储存起来，当能量紧急缺乏或需要时，再将存储的能量通过控制单元释放出来，准确快速地补偿系统所需的有功和无功，从而实现电能的平衡与稳定控制。2005 年，美国加利福尼亚州建造了 1 台 450kW 的超级电容器储能装置，用以减轻 950kW 风力发电机组向电网输送功率的波动。

除此之外，储能系统对电力系统配电网电能质量的提高也可起到重要的作用。通过逆变器控制单元，可以调节超级电容器储能系统向用户及网络提供的无功功率及有功功率，从而达到提高电能质量的目的。

我国 20 世纪 60 ~ 80 年代建设的 35kV 变电站及 10kV 开关站，绝大多数高压开关（断路器）的操动机构是电磁操动机构。在变电站或配电站的配电室中均配有相应的直流系统，用作分合闸操作、控制和保护的直流电源。这些直流电源设备，主要是电容储能式硅整流分合闸装置和部分由蓄电池构成的直流屏。电容储能式硅整流分合闸装置由于结构简单、成本低、维护量小而在当时得到广泛应用，但是在实际使用中却存在一个致命缺陷：事故分合闸的可靠性差。其原因是储能用电解电容的容量有限，漏电流较大。由蓄电池构成的直流屏虽然能存储很大的电能，在一些重要的变、配电站中成为必需装置，但由于其运营成本极高、使用寿命不长，因此这些装置只能用于 110kV 级别的变电站，难以推广使用。

超级电容器以其超长使用寿命、频繁快速的充放电特性、便宜的价格等优点，使解决上述问题成为可能。如用 2 只 0.85F，240/280V 的超级电容器并后就可完全替代笨重的、需要经常维护的、有污染的蓄电池组。由于一次合闸的能耗只相当

于超级电容器所储能量（70kJ）的3%，而这一能量在浮充电路中又可很快被补充，因而完全适应连续频繁的操动，且具有极高的可靠性。

尽管许多用户选择不间断电源（Uninterrupted Power Supply，UPS）作为电网断电或电网电压瞬时跌落时设备电源的补救装置，但对于电压瞬时跌落而言，UPS显得有些大材小用。UPS由蓄电池提供电能，工作时间持续较长。但是，由于蓄电池自身的缺点（需定期维护、寿命短），使UPS在运行中需时刻注意蓄电池的状态。而电力系统电压跌落的持续时间往往很短（10ms～60s），因此在这种情况下使用超级电容器的优势比UPS明显：其输出电流可以几乎没有延时地上升到数百安，而且充电速度快，可以在数分钟内实现能量存储，便于下次电源故障时作用。因此尽管超级电容器的储能所能维持的时间很短，但当使用时间在1min左右时，它具有无可比拟的优势——50万次循环、不需护理、经济。在新加坡，ABB公司生产的利用超级电容器储能的动态电压恢复装置（DVR）安装在4MW的半导体工厂，以实现160ms的故障穿越。

静止同步补偿器（STATCOM）是灵活交流输电技术（FACTS）的主要装置之一，代表着现阶段电力系统无功补偿技术新的发展方向。它能够快速连续地提供容性和感性无功功率，实现适当的电压和无功功率控制，保障电力系统稳定、高效、优质地运行。基于双电层电容储能的STATCOM，可用来改善分布式发电系统的电压质量。其在300～500kW功率等级的分布式发电系统中将逐渐替代传统的超导储能。经济性方面，同等容量的双电层电容储能装置的成本同超导储能装置的成本相差无几，但前者几乎不需要运行费用，而后者却需相当多的制冷费用。

对于超级电容器，今后要研究的方向和重点是：利用超级电容器的高比功率特性和快速放电特性，进一步优化超级电容器在电力系统中的应用。此外，在我国大力发展新能源这一政策指导下，在光伏发电领域、风力发电领域，超级电容器以其快充快放等特点为改进和发展关键设备提供了有利条件。

1.2 超级电容器的分类

超级电容器作为一种绿色的新型储能元件，在电动汽车、分布式发电系统等领域具有广阔的应用前景[3]。超级电容器按照储能原理不同可分双电层超级电容器、赝电容和混合型超级电容器3类。

1. 双电层超级电容器

双电层超级电容器是利用电极和电解液之间形成的界面双电层来存储能量。双电层型超级电容器，在制造材料上进行了改变，如：活性炭电极材料，结合高比表面积的活性炭材料加工后制成电极；炭气凝胶电极材料，结合前驱材料制备凝胶，再进行碳化活化处理作为电极。当电极和电解液接触时，由于库仑力、分子间力或

者原子间力的作用，致使固态和液态界面出现稳定、符号相反的双层电荷，称为界面双电层。

2. 赝电容

赝电容在一般情况下也称作法拉第准电容，是指在电极表面或体相中的二维或准二维空间上，活性物质进行欠电位沉积，发生高度可逆的化学吸附/脱附或者氧化/还原反应，从而产生法拉第电容。赝电容型超级电容器，一般采用了金属氧化物电极材料、聚合物电极材料，它可以分为吸附赝电容和氧化还原赝电容。

3. 混合型超级电容器

混合型超级电容器可划分为以下 3 种类型（依据不同类型的电极材料）：

1）由同时具有双电层电容特征的电极和赝电容特征的电极，或者由两种不同类型赝电容的电极材料组成。

2）由超级电容器电极和电池的电极组成。

3）由电解电容器的阳极和超级电容器的阴极组成。混合型超级电容器的两极一般分别采用具有高能量密度的活性物质“电池型”材料和具有高功率密度的“电容型”材料，因此具有两者的优点。

1.3 超级电容器的应用前景

超级电容器也叫作电化学电容器，它性能稳定，比容量为传统电容器的 20 ~ 200 倍，比功率一般大于 1000W/kg。循环寿命和可存储的能量比传统电容要高得多，并且充电快速。由于它们的使用寿命非常长，可被应用于终端产品的整个生命周期。当高能量电池和燃料电池与超级电容器技术相结合时，可实现高功率密度、高能量密度特性和长的工作寿命。近年来，大功率超级电容器在电动车、太阳能装置、重型机械等领域所表现出的朝阳产业趋势，许多发达国家都已把超级电容器项目作为国家重点研究和开发项目，超级电容器的国内外市场正呈现出前所未有的蓬勃景象。

超级电容器的应用已经日渐成熟，在工业、通信、医疗器械、军事装备和交通等领域得到广泛的应用[4]。从小容量的应急储能到大规模的电力储能，从单独储能到与蓄电池或燃料电池组成混合储能系统，超级电容器均显示出独特的优越性。概括起来，超级电容器的应用方向可分为以下 4 个领域。

1. 小功率电子设备的主电源、替换电源或后备电源

1）主电源：超级电容器适合应用于主电源。典型的应用有电动玩具，其作为主电源的优点是体积小、重量轻、功率密度大和能够迅速地起动。

2）替换电源：超级电容器也适合应用于替换电源。典型的应用有路标灯、太

阳能手表、交通信号灯和公共汽车停车站时间表灯等。

3）后备电源：超级电容器广泛应用于后备电源。典型的应用有车载计量器、车载计费器、无线电波接收器和照相机等。

2. 混合电动汽车和电动汽车

超级电容器的寿命是电化学电池（蓄电池和锂离子电池等）的数百倍，并且不需要维护，因此超级电容器应用于电动汽车的总费用远低于一般电化学电池的电动汽车[5]。当前世界各国均在开发电动汽车，其中投入最大的是混合电动汽车（Hybrid Electric Vehicle）。混合动力汽车是应用蓄电池为电动汽车提供正常运行功率，而加速和爬坡时需要瞬时大功率的场合应用超级电容器来补充功率，同时，应用超大容量电容器存储制动时产生的再生能量。所以，电动汽车应用超级电容器后具有起步快、加速快和爬坡能力强等优点。

3. 可再生能源发电系统和分布式电力系统

超级电容器可以充分发挥储能密度高、功率密度大、循环寿命长和无须维护等优点，既可以单独储存能量，又可以与其他储能系统混合储能。超级电容器可以与太阳能电池相结合，应用在路灯、交通警示牌和交通标志灯等，还可以应用于分布式发电系统，比如风力发电站，水力发电站等，通过超级电容器储能可以对系统起到瞬间功率补偿的作用，用来提高供电系统的稳定性和可靠性。这种供电方式能够很好地补偿发电设备的输出功率不稳定和不可预测的特点。

4. 能量缓冲器

能量缓冲器是由超级电容器和功率变换器组成，它主要应用于电梯等变频驱动系统。当电梯加速上升时，能量缓冲器向驱动系统中的直流母线供电，提供电动机所需的峰值功率；当电梯减速下降时，能量缓冲器吸收电动机回馈的能量。

超级电容器在便携式仪器仪表中如驱动微电动机、继电器、电磁阀中可以替代电池工作。它可以避免由于瞬间负载变化而产生的误操作。超级电容器还可用于对照相机闪光灯进行供电，可以使闪光灯达到连续使用的性能，从而提高照相机连续拍摄的能力。它应用在可拍照手机上，能使得拍照手机可以使用大功率 LED。超级电容器技术还可应用在移动无线通信设备中。这些设备往往采用脉冲的方式保持联络，由于超级电容器的瞬时充放电能力强，可以提供的功率大，因此在这一领域的应用非常广阔。在众多大型石化、电子、纺织等企业的重要电力系统特别是在大功率系统上的瞬态稳压稳流，超级电容器几乎是不可替代的元件。另外，芯片企业在选址时考虑电力的波动也是一个非常重要的环节，而超级电容器系统则可以完全解决这个问题。

超级电容器在短时 UPS 系统、电磁操作机构电源、太阳能电源、汽车防盗、汽车音响等系统上也具有不可替代的作用。在风力发电或太阳能发电系统中，由于

风力与太阳能的不稳定性，会引起蓄电池反复频繁充电，导致寿命缩短，超级电容器可以吸收或补充电能的波动，从而解决这一问题。超级电容器在电动汽车、混合燃料汽车和特殊载重车辆方面也有着巨大的应用价值和市场潜力。作为电动汽车和混合动力汽车的动力电源，可以单独使用超级电容器或将其与蓄电池联用。这样，超级电容器在用作电动汽车的短时驱动电源时，可以在汽车起动和爬坡时快速提供大电流从而获得功率以提供强大的动力；在正常行驶时由蓄电池快速充电；在制动时快速存储发电机产生的瞬时大电流，从而减少电动汽车对蓄电池大电流放电的限制，延长蓄电池的循环使用寿命，提高电动汽车的实用性超级电容器在电动助力车市场上的应用也正在扩展。电动助力车上的蓄电池由于其充放电电流要求苛刻，能量难以进行瞬时回收，而超级电容器非常容易满足这些要求。超级电容器在电动助力车起动、加速与爬坡时对系统进行能源补充，并在制动时完全回收能量，提高系统性能。

超级电容器作为21世纪重点发展的新型储能产品之一，正在为越来越多的国家和企业争相研制和生产，其进步之迅速有目共睹。在1991年举办的第1届国际双电层电容器与混合能量存储器年会中，最大的单体电容器是由松下公司设计开发的容量为470F的电容器，其电压为2.3V。而今天，松下公司生产的相同尺寸的单体电容器，其容量已经超过了2000F。同时，不只是松下公司，世界上许多公司都已经开始进入到这个领域中来。这些公司主要从事发展大型制造技术和市场销售，以便使电容器产品能够和市场上的便携式电子设备和脉冲功率用电器配套使用。可以说，如今的超级电容器市场已经进入群雄逐鹿的时代：Maxwell在San Diego的公司是美国最主要的大型电化学电容器的生产厂家；PowerStor公司是由Lawrence Livermore实验室的炭气凝胶技术发展起来的，现在已经颇具规模；韩国的Ness公司，一开始就对小型储能器感兴趣，它的产品已经遍及整个市场，从小型的一直到最大型的，都有产品生产，现在已经发展成为一支在电化学电容器脉冲功率性能方面独占鳌头的公司；德国的Siemens Matsushita公司的产品也大大超越了其以前所有的产品，它所属Maxwell公司旗下，后成为EPCOS公司；最近，作为世界电解电容器行业中重要成员之一的日本化学公司，现在也已正式加入到超级电容器行业中——由Okamura先生创办的Power System公司现在已经拥有了一条大型产品的生产线；俄罗斯的ECOND公司、ELIT公司和ESMA公司的某些产品也是超级电容器队伍中不可小觑的力量，其中，俄罗斯的ESMA公司是生产无机混合型超级电容器的代表。

近年来，我国一些公司也开始积极涉足这一产业，并已经具备了一定的技术实力和产业化能力，重要企业有锦州富公司、北京集星公司、北京合众汇能、上海奥威公司、锦州锦容公司、石家庄高达公司、北京金正平公司、锦州凯美公司、大庆振富科技、哈尔滨巨容公司、南京集华公司、新宙邦公司等。其中新宙邦公司现已成为全球主流的超级电容器制造商，如美国Maxwell公司、REDI公司等上游厂商