



南京航空航天大学
研究生系列精品教材

能源储存与利用技术

鹿 鹏 主编



科学出版社

南京航空航天大学研究生系列精品教材

能源储存与利用技术

鹿 鹏 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书详细阐述了热能储存、机械能储存、电池储能、储氢与燃料电池以及新型储能技术的原理、应用与进展,并结合大量具体案例进行分析。全书共6章,第1章主要介绍能源和能源储存技术的基本概念、意义;第2章介绍热能储存技术的基本原理,重点在太阳能和工业余热上的应用;第3章介绍抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能等机械能储存与利用技术;第4、5章介绍电池储能、储氢与燃料电池技术;第6章介绍一些新型的储能技术及其应用。

本书可作为高等院校动力工程及工程热物理专业的高年级本科生和研究生的教材,也可作为相关的科研、工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

能源储存与利用技术 / 鹿鹏主编. —北京: 科学出版社, 2016.6
ISBN 978-7-03-048811-4

I. ①能… II. ①鹿… III. ①能源-储存②能源-利用 IV. ①TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 132902 号

责任编辑: 余 江 张丽花 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 6 月第一次印刷 印张: 8 3/4

字数: 202 000

定价: 48.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着资源和环境问题的日益突出，能源储存与利用技术日益受到重视。能源储存是指将电能、热能、机械能等不同形式的能源转化为某种形式的能量储存起来，如化学能、势能、动能、电磁能等多种形态，待需要时再将其转化为所需要的能量形式释放出去。

能源储存与利用技术对现代化的能源生产和调配产生重要作用，同时也是可再生能源利用过程中的关键技术环节，主要体现在：电网调节，提高电能质量和供电可靠性；提高可再生能源的利用效率；为电动车辆、舰船等装备提供高效、高储能密度的电源等。例如，以风能和太阳能为代表的可再生能源大规模并网发电亟须储能技术的支持，因为可再生能源的弱点是随机性、间歇性和波动性较大，对电网稳定性冲击很大，影响电力系统的安全性和经济性。把储能技术与可再生能源利用技术相结合，可以提高系统稳定性、改善电能品质、提高资源利用率。

本书详细阐述了热能储存、机械能储存、电池储能、储氢与燃料电池以及新型储能技术的原理、应用与进展，并结合了大量具体案例分析。全书共6章：第1章主要介绍能源和能源储存技术的基本概念、意义；第2章介绍热能储存技术的基本原理，重点在太阳能和工业余热上的应用；第3章介绍抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能等机械能储存与利用技术；第4、5章介绍电池储能、储氢与燃料电池技术；第6章介绍一些新型的储能技术及其应用。

本书得到南京航空航天大学研究生教材出版项目的资助，特此感谢！在本书成稿过程中，南京航空航天大学能源与动力学院的研究生姜瑞雪、李伟、郑星文等协助完成了部分章节的绘图和整理工作，在此表示衷心的感谢！感谢科学出版社的编辑为本书的出版所做的工作。

能源储存与利用技术涉及跨学科、多领域的专业知识，感谢华南理工大学樊栓狮教授、郑州大学郭茶秀教授、清华大学肖曦教授、中国科学院电工研究所唐西胜研究员给予的点拨与指导。

由于能源储存与利用领域中相当一部分技术处于前沿，且知识更新日新月异，受编者水平和专业领域所限，本书难免存在疏漏和不足之处，恳请广大读者批评指正。

鹿 鹏

于南京航空航天大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 基本概念	1
1.1.1 能源	1
1.1.2 能源储存	2
1.1.3 能源储存技术	2
1.2 能源类型	2
1.3 能源供求矛盾与储能	5
1.4 储能技术与应用	5
1.4.1 热能存储技术	6
1.4.2 机械能存储技术	6
1.5 储能的形式	7
1.5.1 物理储能	7
1.5.2 电磁储能	9
1.5.3 电化学储能	10
1.5.4 相变储能	12
1.6 储能装置的应用	12
第 2 章 热能储存	19
2.1 热能储存基本原理	19
2.1.1 显热储存	19
2.1.2 潜热储存	23
2.1.3 化学反应热储存	27
2.2 工业余热的储能系统	31
2.2.1 余热资源基本情况介绍	31
2.2.2 余热的种类	32
2.2.3 余热的利用方式	32
2.2.4 余热回收的换热设备	33
2.2.5 余热回收中的能量存储	44
2.3 太阳能热储存	46
2.3.1 太阳能热储存的类型	46
2.3.2 太阳能储能热利用系统实例	47
2.4 储热容器的设计	52
2.4.1 储热罐的几何形状	52

2.4.2	储热罐的材料	53
2.4.3	储热罐的机械压力和热应力	53
2.4.4	储热罐的热损耗	53
2.5	热能储存的应用实例	55
2.5.1	聚光式太阳能发电应用	55
2.5.2	建筑和工业过程应用	57
第3章	机械能储存	59
3.1	抽水蓄能	59
3.1.1	基本原理	59
3.1.2	抽水蓄能系统的效率和功率	60
3.1.3	抽水蓄能系统的组成	60
3.1.4	抽水蓄能系统的功能	62
3.2	压缩空气储能	63
3.2.1	简介	63
3.2.2	系统的运行原理	63
3.2.3	压缩空气储能电站实例	65
3.2.4	压缩空气储能系统的运行特性	66
3.2.5	压缩空气系统的性能指标	68
3.2.6	前沿技术	70
3.3	飞轮储能	71
3.3.1	飞轮储能简介	71
3.3.2	飞轮储能工作原理	72
3.3.3	飞轮储能系统的关键技术	73
3.3.4	国内外飞轮储能关键技术的发展现状	75
第4章	电池储能	78
4.1	电池储能简介	78
4.2	储能电池	79
4.2.1	铅酸电池	79
4.2.2	钠硫电池	80
4.2.3	锂离子电池	81
4.2.4	全钒液流电池	83
4.3	电池储能系统构建	85
4.3.1	配置方式	85
4.3.2	电池系统	85
4.4	电池储能系统的应用	88
4.4.1	集中式发电	88
4.4.2	分布式发电	88

第 5 章	储氢与燃料电池	90
5.1	氢能介绍	90
5.2	氢的储存	91
5.3	储氢研究动向	92
5.3.1	高压储氢	92
5.3.2	储氢合金	92
5.3.3	有机化合物储氢	93
5.3.4	碳凝胶	95
5.3.5	玻璃微球	96
5.3.6	氢浆储氢	96
5.3.7	冰笼储氢	97
5.4	燃料电池的基本原理	97
5.5	燃料电池的分类及特征	99
5.5.1	碱性燃料电池	99
5.5.2	磷酸型燃料电池	100
5.5.3	固体氧化物燃料电池	101
5.5.4	熔融碳酸盐燃料电池	103
5.5.5	质子交换膜燃料电池	104
5.6	燃料电池的发展现状和应用前景	106
第 6 章	新型储能技术及应用	108
6.1	新型热能储能技术	108
6.1.1	蓄热材料	108
6.1.2	蓄热装置	108
6.1.3	蓄热系统	111
6.2	新型压缩空气储能技术	112
6.2.1	AA-CAES 系统(先进绝热压缩空气储能)	113
6.2.2	液化空气储能系统	114
6.3	新型电池储能技术	115
6.3.1	铅酸电池	116
6.3.2	钠硫电池	116
6.3.3	锂离子电池	117
6.3.4	全钒液流电池	117
6.4	超级电容器	118
6.4.1	简介	118
6.4.2	分类	120
6.4.3	应用	126
参考文献		129

第 1 章 绪 论

能量为人类提供动力，是科技发展和人民生活的重要物质基础。进入 21 世纪后，全球的能源消费迅速增长。经济越发达的工业化国家对能源的消费量越大，不超过全球 10% 人口的英国、法国、美国等发达国家，却消耗了世界能源的 40%。能源的消费量和开发利用水平是衡量科技发展和生活水平的重要标志。

1.1 基 本 概 念

1.1.1 能源

关于能源的定义，目前有 20 种左右。比较典型的有：

《科学技术百科全书》——能源是可从其获得热、光和动力之类能量的资源。

《大英百科全书》——能源是一个包括所有燃料、流水、阳光和风的术语，人类用适当的转换手段便可让它为自己提供所需的能量。

《日本百科全书》——在各种生产活动中，我们利用热能、机械能、光能、电能等来做功，可利用来作为这些能量源泉的自然界中的各种载体，称为能源。

《热能储存技术与应用》——把比较集中且又比较容易转化为机械能、热能、电磁能、化学能等各种人们能够利用的能量的含能物质，称为能源。

能源分类见表 1-1。

表 1-1 能源分类

能量来源	可再生能源		不可再生能源	
	常规能源	新能源	常规能源	新能源
第一类	水能(机械能)	太阳能(热能、光能) 风能(机械能) 生物质能 海水热能(热能) 海流、波浪能(机械能)	各种煤(化学能) 原油(化学能、机械能) 天然气(化学能、机械能)	油页岩(化学能) 油砂(化学能)
第二类		地热能(热能) 火山能(热能) 地震能(热能)		核燃料(铀、钍、钚、钷、钆等)(原子能)
第三类		潮汐能(机械能)		

由表 1-1 可知，能源可分为三大类。第一类能源来自地球之外，包括太阳能，远古动植物在太阳能作用下日积月累形成的矿物燃料(如煤、石油、天然气等)，以及由

于太阳辐射引起大气运动而形成的风能、海洋能等；第二类能源来自地球本身，包括核燃料、地热能等；第三类能源来自地球与其他天体之间的相互作用，如因月球引力的变化引起潮汐现象，潮汐导致海水平面周期性地升降，因海水涨落及潮水流动所产生的潮汐能。

一次能源也可分为可再生能源和不可再生能源。前者是指能够重复产生、取之不尽用之不竭的能源，如太阳能、风能、海洋能、潮汐能等；而后者是指生产周期较长，相对于短暂的人类历史不能够重复产生的能源，如化石能源和核燃料，会随着不断开采和使用而枯竭。

1.1.2 能源储存

能源储存即储能、蓄能，是指使能源转化为在自然条件下比较稳定的存在形态的过程，一般可分为两种形式，即自然的储能和人为的储能。

自然的储能：如植物，太阳能通过光合作用转化为化学能。

人为的储能：如钟表，机械功通过拧紧发条转化为势能。

能源储存按照储存状态下的能量形态，可分为机械储能、化学储能、电磁储能、热能储能等；储能过程往往存在着能量的传递和形态转化。

1.1.3 能源储存技术

在能源的开发、转换、运输和利用过程中，能量的供应和需求之间，往往存在着数量上、形态上和时间上的差异。为了弥补这些差异，有效地利用能源，常采取储存和释放能量的人为过程或技术手段，称为能源储存技术。储能技术作为一种合理、高效、清洁利用能源的重要手段，在能量富余时，利用特殊装置把能量储存起来；在能量不足时释放出来，从而调节能量供求在时间和强度上的不匹配。

1.2 能源类型

目前，人类认识的能量形式有 6 大类：机械能、热能、电能、电磁能、化学能和原子能。

1. 机械能

与物体宏观机械运动或空间状态相关的能量，前者称为动能，后者称为势能。这是人类最早认识的能量形式。机械储能是指将电能转换为机械能存储，在需要使用时再重新转换为电能，主要包括抽水储能、压缩空气储能和飞轮储能。

2. 热能

从分子运动论观点看，热能的本质是物体内部所有分子无规则运动的动能之和。

热能是能量的一种基本形式，所有其他形式的能量都可以完全转换为热能，而且大多数的一次能源都是首先经过热能形式而被利用的，所以研究开发利用热能具有重要意义。

3. 电能

电能是电流所做的功，电流在某段电路上所做的功等于这段电路两端的电压、电流和通电时间的乘积。电能是应用最广泛、使用最方便、最清洁的二次能源，可由光伏效应得到，可由一次能源通过电磁感应转换而成，也可由燃料电池将氢、煤气、天然气等燃料的化学能直接转换而成。图 1-1 所示为各种不同形式的能源转化为电能的途径。

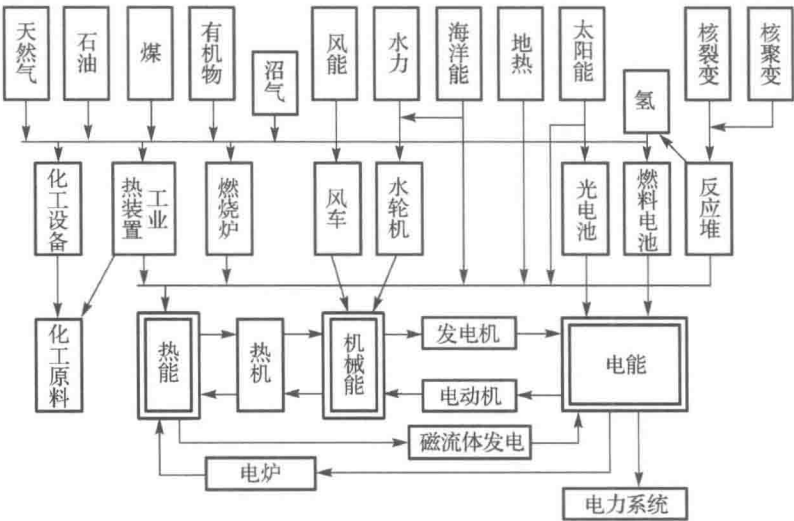


图 1-1 各种能源转化为电能的途径

4. 电磁能

电磁波中电场能量和磁场能量的总和叫做电磁波的能量，也称为辐射能。物体会因各种原因发出辐射能，其中因热而发出的辐射能称热辐射能。

电磁能的大小与放射波的频率成正比： $E=hf$ ， h 为普朗特常数， f 为放射波的频率。

地球表面所接受的太阳能是最重要的热辐射能。太阳能(solar energy)，是指太阳的热辐射能(参见热能传播的三种方式)，主要表现就是常说的太阳光线。在现代一般用作发电或者为热水器提供能源。自地球上生命诞生以来，就主要以太阳提供的热辐射能生存，而自古人类也懂得以阳光晒干物件，并作为制作食物的方法，如制盐和晒咸鱼等。在化石燃料日趋减少的情况下，太阳能已成为人类使用能源的重要组成部分，并不断得到发展。太阳能的利用有光热转换和光电转换两种方式，太阳能发电是一种新兴的可再生能源。广义上的太阳能也包括地球上的风能、化学能、水能等。

太阳能是由太阳内部氢原子发生氢氦聚变释放出巨大核能而产生的，来自太阳的辐射能量。地球轨道上的平均太阳辐射强度为 $1369\text{W}/\text{m}^2$ 。地球赤道周长为 40076km ，从而可计算出，地球获得的能量可达 173000TW 。尽管太阳辐射到地球大气层的能量仅为其总辐射能量的 22 亿分之一，但已高达 173000TW ，也就是说太阳每秒钟照射到地球上的能量就相当于 500 万吨煤，每秒照射到地球的能量则为 49940000000J 。地球上的风能、水能、海洋温差能、波浪能和生物质能都是来源于太阳；即使是地球上的化石燃料(如煤、石油、天然气等)从根本上说也是远古以来储存下来的太阳能，所以广义的太阳能所包括的范围非常大，狭义的太阳能则限于太阳辐射能的光热、光电和光化学的直接转换。

太阳能具有以下四大优点。

(1) 普遍。太阳光普照大地，没有地域的限制，无论陆地或海洋，无论高山或岛屿，处处皆有，可直接开发和利用，便于采集，且无须开采和运输。

(2) 无害。开发利用太阳能不会污染环境，它是最清洁能源之一，在环境污染越来越严重的今天，这一点是极其宝贵的。

(3) 巨大。每年到达地球表面上的太阳辐射能约相当于 130 万亿吨煤，其总量属现今世界上可以开发的最大能源。

(4) 长久。根据太阳产生的核能速率估算，氢的储量足够维持上百亿年，而地球的寿命也约为几十亿年，从这个意义上讲，可以说太阳的能量是用之不竭的。

然而，太阳能也具有一定的缺点。

(1) 分散性。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。平均说来，北回归线附近，夏季在天气较为晴朗的情况下，正午时太阳辐射的辐照度最大，在垂直于太阳光方向 1m^2 面积上接收到的太阳能平均有 1000W 左右；若按全年日夜平均，则只有 200W 左右。而在冬季大致只有一半，阴天一般只有 $1/5$ 左右，这样的能流密度是很低的。因此，在利用太阳能时，想要得到一定的转换功率，往往需要面积相当大的一套收集和转换设备，造价较高。

(2) 不稳定性。由于受到昼夜、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，这给太阳能的大规模应用增加了难度。为了使太阳能成为连续、稳定的能源，从而最终成为能够与常规能源相竞争的替代能源，就必须很好地解决蓄能问题，即把晴朗白天的太阳辐射能尽量储存起来，以供夜间或阴雨天使用，但蓄能也是太阳能利用中较为薄弱的环节之一。

(3) 效率低和成本高。太阳能利用的发展水平，有些方面在理论上是可行的，技术上也是成熟的。但有的太阳能利用装置，因为效率偏低，成本较高，现在的实验室利用效率也不超过 30%，总的来说，经济性还不能与常规能源相竞争。在今后相当一段时期内，太阳能利用的进一步发展，主要受到经济性的制约。

5. 化学能

化学能是物质结构能的一种，即原子核外进行化学变化时放出的能量，是由粒子(分

子、原子、离子)之间发生化学反应而释放的能量。人类利用最普遍的化学能是燃烧碳和氢，它们是煤、石油、天然气、薪柴等燃料中的主要可燃元素。

6. 原子能

原子能是粒子相互作用而释放的能，是蕴藏在原子核内的物质结构能。核燃料(如铀235)，具有体积小、能量大的优点，1g 铀 235 可以释放约等于 30t 标准煤完全燃烧释放的能量。原子核反应包括放射性衰变、裂变和聚变三种，可为航空母舰、核潜艇等大型舰船提供动力，也可用来发电发热。

1.3 能源供求矛盾与储能

能量供求往往存在着矛盾，如新能源或可再生能源，其供应的能量随时间、季节呈周期性或非周期性变化，不具备定量持续供应的特性；再如电力，输出容量固定，但是需求随时间变化。能源储存系统可以储存多余的热能、动能、电能、位能、化学能等，改变能量的输出容量密度、输出地点、输出时间等，提高能源利用体系的效率。

如峰期电力紧张，谷期电力过剩，用电峰谷差大，因此可将谷期(深夜和周末)的电能储存起来供峰期使用，可大大改善电力供需矛盾，提高发电设备利用率。

太阳能热利用系统中，可以设置储能器。热流离开集热器后进入储能器，然后经过热能转换器供给热机。无太阳光时，冷流体直接经过储能器，提取储存的热量并传给热机工作。

一个好的储能系统应当具备如下特征。

- (1)单位容积所储存的能量高；
- (2)具有良好的负荷调节性能，储能系统在使用时，能够根据用能一方的要求调节其释放能量的大小和速度；
- (3)能源储存效率高，能源传递和转换效率高，过程中的泄露、蒸发、摩擦等损耗小；
- (4)系统成本低，长期运行可靠，具有良好的经济性。

1.4 储能技术与应用

储能主要包括热能、机械能、电能、化学能、电磁能等能量的存储，常见的储能技术见表 1-2。

表 1-2 储能技术方法

项目	热能	电能	化学能	电磁能
储能技术	显热存储 潜热存储 化学能存储	水力储能 压缩空气 飞轮	蓄电池 合成燃料 化学储能	电容器 超导线圈

目前储能技术的研究、开发和应用主要是以储存热能、电能为主，广泛应用于太阳能利用、电力的“削峰填谷”、废热回收利用以及空调节能等领域。

1.4.1 热能存储技术

热能存储是把一个时期内暂时用不到的多余热量通过某种方法储存起来，待需要时再提取使用。热能存储技术主要分为显热储能、潜热储能和化学反应热储能三种，其简要特性如表 1-3 所示。

表 1-3 三种热能存储的比较

特性	显热储能	潜热储能	化学反应热储能
储热容量	小	较小	大
复原特性	在可变温度下	固定温度下	在可变温度下
隔热措施	需要	需要	不需要
能量损失	长期储存时较大	长期储存时相当大	低
工作温度	低	低	高
运输情况	适合短距离	适合短距离	适合长距离

显热储能技术通过加热储能介质提高温度，从而储存热能，过程不涉及相变。常用的显热储能材料有水、土壤和岩石等。从单位体积的储热量来看，水最大，土壤其次，岩石最小。显热储能技术是一种技术比较成熟、效率较高、成本较低的储能方法。

潜热储能技术是利用储能介质液相与固相之间的相变产生的溶解热将热能储存起来的。目前实际应用的潜热储能介质有 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ， $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ， $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 。该技术的特点是适宜低温储能，储能密度较高，可在一定的相变温度下释放热量。但是，潜热储能介质往往价格昂贵，容易腐蚀，有的介质还可能产生分解反应，储能装置比显热储能装置要复杂，技术难度较大。

化学反应热储能技术利用能量把化学物质分解后储存能量，分解后的物质再化合时，释放储存的热能。可以利用可逆分解反应、有机可逆反应和氢化物化学反应三种技术实现，其中氢化物化学反应技术是最具有发展潜力的技术，若取得突破性的成功，可为解决能源短缺的问题提供良好的途径。

1.4.2 机械能存储技术

工业上已经得到应用的电能储存技术主要有三种，分别是水力储能、压缩空气储能和飞轮储能技术。

水力储能技术是目前最古老、技术最成熟、设备容量最大的商业化技术，全世界已建有超过 500 座水力储能电站。水力储能系统一般有两个大的储水库，一个处于较低位

置(下水库)，另一个处于较高位置(上水库)。在用电低峰期，将水从下水库抽至上水库储存起来。当需要用到电能时，再借助上水库水流的势能推动水轮机发电。

压缩空气储能是在用电低峰期把空气加压输送到地下盐矿、废弃的石矿或者地面大型储罐。在用电高峰期，压缩空气可与燃料燃烧，产生高温高压燃气，驱动燃气轮机产生电能。目前应用的机组设备容量已达到几百兆瓦。

飞轮储能发电技术是一种较新型的储能技术，它与电网连接实现电能的转换。飞轮储能发电系统如图 1-2 所示。

该系统由电机、飞轮、电力电子转换器等设备组成。飞轮储能的基本原理就是在电力富裕时，将电力系统中的电能转换成飞轮运动的动能。在电力系统电能不足时，再将飞轮运动的动能转换成电能，供电力用户使用。与其他储能技术相比，飞轮储能具有效率高(80%~90%)、成本低、无污染、储能迅速、技术可靠等优点。

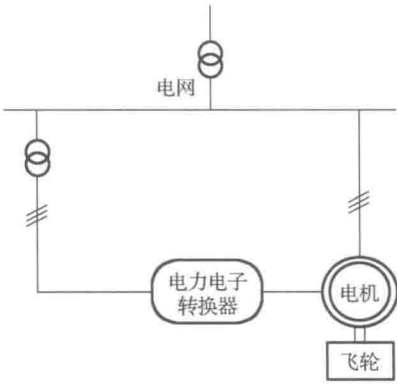


图 1-2 飞轮储能发电系统

1.5 储能的形式

电能可以转换为化学能、势能、动能、电磁能等形态存储，到目前为止，人们已经开发了多种形式的储能系统，按照其具体方式可分为物理、电磁、电化学和相变储能四大类型。其中物理储能包括抽水蓄能、压缩空气储能和飞轮储能；电磁储能包括超导、超级电容和高能密度电容储能；电化学储能包括铅酸、镍氢、镍镉、锂离子、钠硫和液流等电池储能；相变储能包括冰蓄冷储能等。其中适合于大规模储能的有液流储能系统技术、钠硫储能系统技术和压缩空气储能技术等。

1.5.1 物理储能

1. 抽水蓄能电站

抽水蓄能电站在负荷低谷的时候，抽水蓄能设备工作在电动机状态，将下游的

水抽到上游，将电能转变为水的势能；在负荷峰值的时候，抽水储能设备工作在发电机状态，上游的水流下，通过发电机将水的势能转变为电能。它是目前电力系统中技术最成熟、应用最广泛的储能方式。抽水蓄能主要应用领域包括削峰填谷、调频、调相、紧急事故备用、黑启动及提供系统的备用容量，还可以提高发电端火电厂和核电站等的运行效率。抽水蓄能电站可以在电网负荷出现突然变化时，几分钟内快速响应，这是其他类型发电厂所无法比拟的，如果同风能发电、太阳能发电等联合组成小的供电网络，还可以应用在偏远地区或者孤岛上。同时，抽水蓄能电站可以根据存储电能的多少合理地设计水库的容量，在当前风能、太阳能发电及核电等大规模发展建设的情况下，抽水蓄能电站作为电网安全可靠运行的保障，成为电网不可或缺的部分。但抽水蓄能受地理位置、生态环境及建设周期(一般要4~5年)等各方面的影响较大。

2. 飞轮储能

在负荷低谷的时候电网中富余的电能带动飞轮旋转，以动能的形式储存能量，完成电能—机械能的转换过程；在负荷峰值的时候，高速旋转的飞轮作为原动机带动发电机旋转发电，经功率变换器输出电流和电压，完成机械能—电能转换的释放能量过程。

飞轮储能系统由高速飞轮、轴承支撑系统、电动机/发电机、功率变换器、电子控制系统和真空泵、紧急备用轴承等附加设备组成。飞轮储能功率密度大于5kW/kg，能量密度超过20W·h/kg，效率在90%以上，循环使用寿命长，工作温区为-40~50℃，无噪声，无污染，维护简单，可连续工作，积木式组合后可以实现兆瓦级，输出持续时间为几分钟至几个小时。飞轮储能具有储能密度大、效率高、建设周期短、寿命长、高储能、充放电快捷、充放电次数无限、瞬时功率大、响应速度快、维护费用低、环境污染小、深放电、不受地理环境限制等特点，可以在很大程度上解决新能源发电的随机性、波动性问题，实现新能源发电的平滑输出，有效调节新能源发电引起的电网电压、频率及相位的变化。飞轮储能的缺点是发电时间短，只能放电几十秒至数分钟，而且设备成本高，部件更换昂贵。飞轮储能正向高转速、高温超导方向发展。飞轮储能主要用于不间断电源(Uninterrupted Power Supply, UPS)/应急电源(Emergency Power System, EPS)、电网调峰和频率控制。

3. 压缩空气储能

在负荷低谷的时候，电网中富余的电能来压缩空气，将其存在高压罐中；在负荷峰值的时候释放出来驱动燃气轮机发电。压缩空气储能系统可以用于冷启动、黑启动；因其响应速度快，主要用于峰谷电能回收调节、平衡负荷、频率调制、分布式储能和发电系统备用。

第一座压缩空气储能电站建于德国 Huntorf，于1978年投入使用，其主要功能是作为紧急备用电力或平滑负荷，此系统能够在2h内供应290MW的电力。第二座压缩

空气储能电站建于 1991 年, 位于美国阿拉巴马州, 它把压缩空气储存在地下深度为 450m 的废盐矿中, 该系统可以为 110MW 的燃气轮机连续提供 26h 的压缩空气。日本于 1998 年开工建设北海道三井砂川储气库, 并于 2001 年投入使用, 输出功率为 2MW。此外, 加拿大、英国、法国等也长期致力于压缩空气储能的开发研究, 而我国目前处于研究阶段, 尚无此应用。压缩空气储能的优点是发电时的燃料消耗比调峰用燃气轮机组减少了 1/3, 所消耗的燃气要比常规燃气轮机少 40%, 建设投资和发电成本低于抽水蓄能电站, 安全系数高, 寿命长; 缺点是其能量密度低, 并受地理环境如岩层等地形条件的限制。随着分布式能源在电网中比例的增大, 小型化压缩空气库和提高储能压力是未来的发展方向。

1.5.2 电磁储能

1. 超导体储能系统

超导储能系统(Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES)利用由超导线制成的线圈, 将电网供电励磁产生的磁场能量储存起来, 在需要时再将储存的能量送回电网或作他用。

超导储能系统通常包括置于真空绝热冷却容器中的超导线圈、深冷和真空泵系统以及作为控制用的电力电子装置。电流在由超导线圈构成的闭合电感中不断循环, 不会消失。

超导储能与其他储能技术相比具有显著的优点: ①由于可以长期无损耗储存能量, 能量返回效率很高; ②能量的释放速度快, 通常只有几秒钟; ③采用 SMES 可使电网电压、频率、有功和无功率容易调节。高温超导和电力电子技术的发展促进了超导储能装置在电力系统中的应用, 在 20 世纪 90 年代已被应用于风力发电系统。SMES 快速的功率吞吐能力和较为灵活的四象限调节能力, 使得它可以有效地跟踪电气量的波动, 提高系统的阻尼。各种研究表明, SMES 装置在改善风电场稳定性方面具有优良的性能。

目前在分布式发电系统中, SMES 储能单元常用于孤岛型的风力发电系统和光伏发电系统, 随着风力发电向规模化、产业化发展, 以及装置成本的降低, SMES 也会在并网型风电系统中大量应用。超导储能今后主要的研究方向是: 变流器和控制策略, 降低损耗和提高稳定性, 开发高温超导(High-Temperature Superconductor, HTS)线材, 失超保护技术等。

此外, 超导储能技术还可以用于配电网的电压支撑、功率补偿、频率调节、提高系统稳定性和功率输送能力中。

2. 超级电容储能系统

超级电容器根据电化学双电层理论研制而成, 可提供强大的脉冲功率, 充电时处于理想极化状态的电极表面, 电荷将吸引周围电解质溶液中的异性离子, 使其附于电极表面, 形成双电荷层, 构成双电层电容。由于电荷层间距非常小(一般在 0.5mm 以下), 加

之采用特殊电极结构，电极表面积成万倍增加，从而产生极大的电容量。在很小的体积下达到法拉级的电容量；无须特别的充电电路；与电池相比，过充、过放都不对其寿命构成负面影响；从环保的角度考虑，它是一种绿色能源；超级电容器可焊接，因而不存在像电池接触不牢固等问题；由于电介质耐压低，存在漏电流，储能量和保持时间受到限制；和铝电解电容器相比。它内阻较大，因而不可以用于交流电路，必须串联使用，以增加充放电控制回路和系统体积。在电力系统中多用于短时间、大功率的负载平滑和电能质量高峰值功率场合。

1.5.3 电化学储能

电池储能主要是通过电池正负极的氧化还原反应来进行充放电的。蓄电池储能系统(Battery Energy Storage System, BESS)由电池、直—交逆变器、控制装置和辅助设备(安全、环境保护设备)等组成，目前在小型分布式发电中应用最为广泛。根据所使用化学物质的不同，蓄电池可以分为铅酸电池、镍镉电池、镍氢电池、锂离子电池等。

传统的蓄电池储能存在着初次投资高、寿命短、对环境有污染等诸多问题。值得注意的锂离子电池是近年来兴起的新型高能量二次电池，由日本的索尼公司在 1992 年率先推出。以其工作电压高、体积小、储能密度高(300~400kW·h/m³)、无污染、循环寿命长(每次放电不超过储能的 80%时可充 3000 次)等特点而受到人们的重视和欢迎。此外，锂离子电池的充放电转化率达 90%以上，这比抽水蓄能电站的转化率高，也比氢燃料电池的发电率(80%)高。目前分布式发电采用蓄电池储能时较多的还是采用传统的铅酸电池，种种优点使得锂离子电池在未来的分布式发电储能中将发挥越来越重要的作用。近年来开发的其他新型蓄电池还有 NaS 电池、钒电池等。

除了应用于分布式发电，蓄电池储能在电力系统中还用来调峰和频率控制。为了提高电网抵御停电事故的能力，美国阿拉斯加电网安装了 1 台可提供峰值达 26.7MW 电力的在线蓄电池储能系统。该系统耗资 3000 万美元，可使系统大停电的可能性减少至少 60%。

表 1-4、表 1-5 中分别显示了一些种类电池的基本特性和由它们构成的储能系统目前已达到的性能指标对比。

表 1-4 常见电池储能系统的特点与应用场合

储能类型	典型额定功率	额定容量	特点	应用场合
铅酸电池	5kW~50MW	几分钟至几小时	技术成熟，成本低，寿命短，环保问题	电能质量 电站备用
液流电池	5kW~100MW	1~20h	寿命长，可深放，适于组合，效率高，环保性好；但能量密度低	电能质量 调峰填谷 EPS
钠硫电池	100kW~100MW	数小时	比能量和比功率高。高温条件、运行安全问题有待改进	可再生储能 EPS
锂电池	100~170W	几分钟至几小时	比能量高。成组寿命、安全问题有待改进	备用电源 UPS