
储能技术 配套课件

目录

第1章 储能概述

第2章 抽水蓄能

第3章 压缩空气储能

第4章 电化学储能

第5章 氢储能

第6章 储热技术

第7章 飞轮、超导与超级电容器

第8章 储能电站运行控制

第9章 储能经济性分析

第1章 储能概述

- 储能的概念
- 储能的作用
- 储能的分类
- 储能发展简史
- 未来储能发展动向
- 我国储能现状及挑战
- 本书主要内容
- 总结与展望

1.1 储能的概念

□ 广义的储能

从广义上讲，储能即能量存储，具体是指通过某种介质或设备，将一种能量用相同或不同形式的能量存储起来，在某一时刻再根据需要以特定的形式进行释放的过程。

广义的储能包括一次能源（原煤、原油、天然气、核能、太阳能、水能和风能等）、二次能源（电能、氢能、煤气和汽油等）和热能等各种形式的能量的存储。

□ 狭义的储能

从狭义上讲，储能是指利用机械、电气、化学等方式将能量存储起来的一系列技术和措施。

本书介绍的储电、储热和储氢即属于狭义的储能。

1.1 储能的概念

□ 储能的基本特性

- 1) 存储容量。**顾名思义，存储容量是指储能系统**所能存储的有效能量**，主要用于描述储能系统对能量的存储能力。
- 2) 实际使用能量。**实际使用能量是指储能系统在使用过程中**所能释放的有效能量**，主要用于描述储能系统对能量的释放能力。
- 3) 能量转换效率。**能量转换效率是指储能系统在完成某次充放电循环后，**所能释放的有效能量与所能存储的有效能量的比值**。由于能量在存储过程中会产生损耗，能量转换效率小于1。
- 4) 能量密度。**从质量或体积的角度，能量密度可分为质量能量密度与体积能量密度，分别对应**单位质量或体积的储能系统所能存储的有效能量**。

1.1 储能的概念

□ 储能的基本特性

5) 功率密度。与能量密度类似，功率密度可分为质量功率密度与体积功率密度，分别对应**单位质量或体积的储能系统所能输出的最大功率**。

受储能材料限制，储能系统通常难以兼具较高的能量密度和功率密度。比如，抽水蓄能系统的能量密度较大，但功率密度较小；蓄电池的功率密度普遍较高，但能量密度往往偏小。

6) 自放电率。自放电率是指储能系统在**单位时间内的自放电量**，主要用以反映储能系统对所存储的能量的保持能力。

7) 循环寿命。储能系统每经历一个完整的能量存储和释放过程，便称为一个循环。储能系统在寿命周期内**所能实现的最大循环次数**，称为循环寿命。

8) 其它指标。除上述指标外，常用的储能技术指标还包括**技术成熟度、兼容性、可移植性、安全性、可靠性和环保性**等。

1.2 储能的作用

□ 储能是可再生能源规模化发展的重要支撑

一方面，储能可以提高可再生能源并网消纳率。另一方面，储能可以提高可再生能源电力系统的安全性及电能质量，从根本上促进可再生能源的开发利用。



□ 储能电池是新能源汽车的核心部件

未来电动汽车中的电池系统可以作为一个存储单元与电网进行互动，从而降低用电成本。另一方面，储能电池系统还能在汽车减速制动过程中将汽车的部分动能转化为电能并存储起来，降低能耗。



1.2 储能的作用

□ 储能是现代电网的重要组成部分

储能作为最具代表性的灵活调节资源，可以提高现代电网的安全稳定性，电网也将由“源-网-荷”的传统运行模式逐渐过渡到“源-网-荷-储”的协调运行模式。



□ 储能是构建能源互联网的关键支撑技术

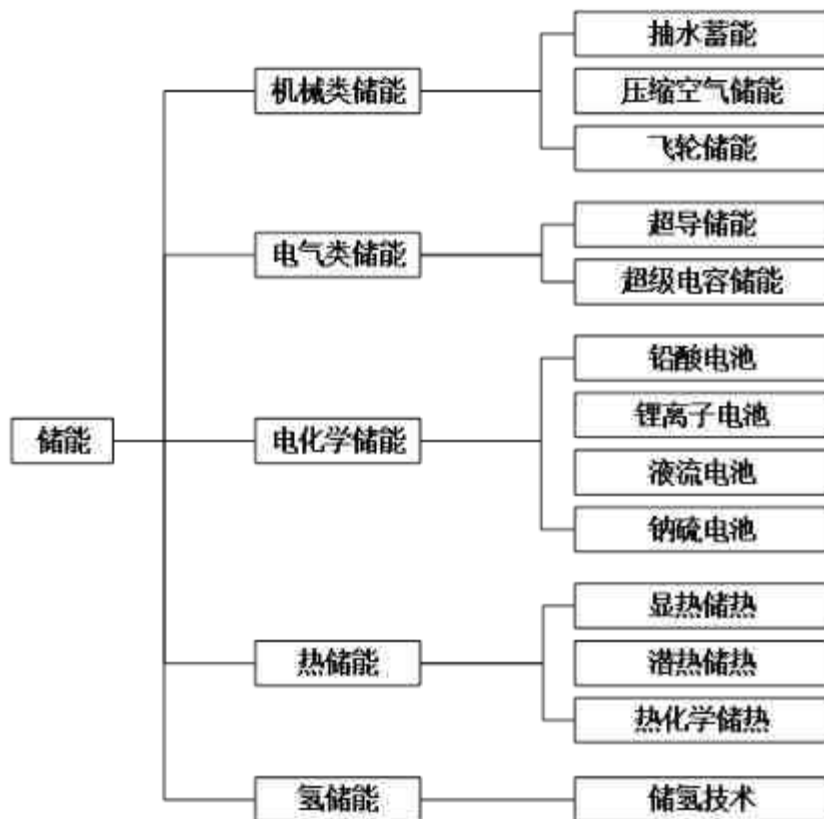
储能包括电化学储能、压缩空气储能、储热和储氢等不同形式的能源储存方式，可以建立多种能源之间的耦合关系，发挥能量中转、匹配和优化等作用，是构建能源互联网的关键支撑技术。



1.3 储能的分类

□ 根据储能载体的类型分类

根据**储能载体的类型**，储能一般可分为机械类储能、电气类储能、电化学储能、热储能和氢储能五大类。



1.3 储能分类

□ 根据储能的作用时间分类

根据**储能的作用时间**不同，可将储能分为分钟级以下储能、分钟至小时级储能和小时级以上储能。

时间尺度	主要储能类型	运行特点	主要应用场景
分钟级以下	超级电容器 超导储能 飞轮储能	动作周期随机 毫秒级响应速度 大功率充放电	辅助一次调频 提高系统电能质量
分钟至小时级	电化学储能	充放电转换频繁 秒级响应速度 能量可观	二次调频 跟踪计划出力 平滑可再生能源发电 提高输配电设施利用率
小时级以上	抽水蓄能 压缩空气储能 储热 储氢	大规模能量存储	削峰填谷 负荷调节

1.3 储能的分类

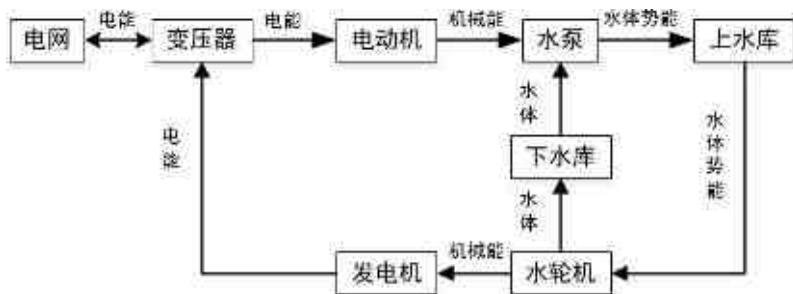
□ 机械类储能

目前，机械类储能技术主要包括抽水蓄能、压缩空气储能和飞轮储能。

◆ 抽水蓄能

抽水蓄能是以水为能量载体的一种储能技术。在电力系统负荷低谷时，通过电动机机械做功，把将下游水库的水抽到上游水库，将过剩的电能转换成水体势能的形式储存起来；在负荷高峰时，通过发电机将存储在上游水库的水体势能转换成电能以供应电力系统的尖峰电量。

抽水蓄能具有调峰、调频、调相、紧急事故备用和黑启动等功能，在电力系统中的应用最为广泛。



1.3 储能的分类

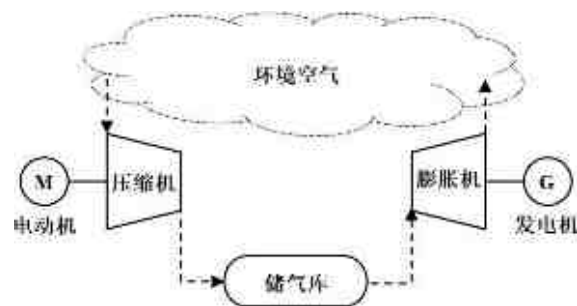
□ 机械类储能

◆ 压缩空气储能

压缩空气储能是以压缩空气为载体的一种储能

技术。储能时，电能或机械能驱动压缩机从环境中吸取空气将其压缩至高压状态并存入储气装置，即将电能或机械能转化为压缩空气的内能和势能；释能时，储气装置中存储的压缩空气进入空气透平中膨胀做功发电，压缩空气中蕴含的内能和势能重新转化为电能或机械能。

压缩空气储能可广泛用于电源侧、电网侧和用户侧，发挥调峰、调频、容量备用、无功补偿和黑启动等作用。



1.3 储能的分类

□ 机械类储能

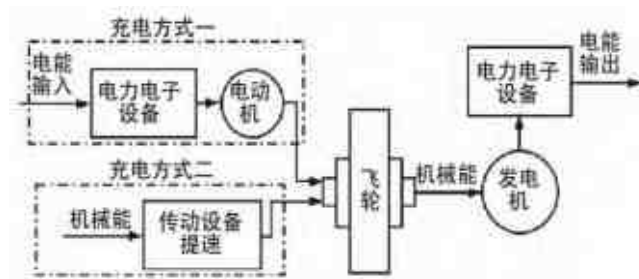
◆ 飞轮储能

飞轮储能系统是**电能与飞轮机械能**的一种

转换装置。**储能时**，电机驱动飞轮高速旋转，将**电能转化为机械能**存储起来；

释能时，电机工作在发电机状态，使飞轮减速，将**机械能转化为电能**。

飞轮储能寿命长，充电时间短，功率密度大，转换效率高，污染低，维护少，但其储能密度低，自放电率较高。飞轮储能适用于电能质量控制、不间断电源等对储能调节速率要求高、但储能时间短的场景。



1.3 储能的分类

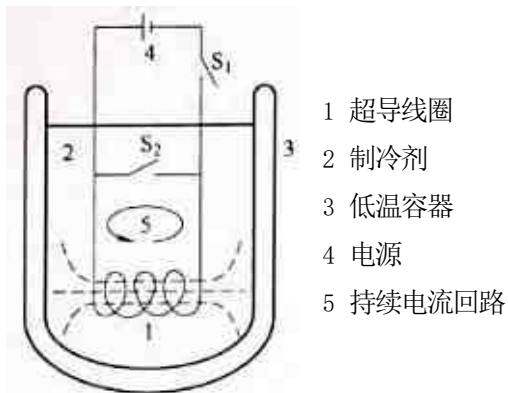
□ 电气类储能

电气类储能主要包括**超导储能**和**超级电容储能**。

◆ 超导储能

超导储能利用超导线圈将**电能**通过整流逆变器**转换成电磁能**的形式存储起来，
在需要时再通过整流逆变器将**电磁能转换为电能**释放出来。

超导储能具有响应速度快(**ms级**)，比功率大(**$10^4 \sim 10^5 \text{ kW/kg}$**)，储能密度大(**$10^8 \text{ J/m}^3$**)，转换效率高(**$\geq 95\%$**)，易于控制，且几乎无污染，但目前主要处于示范应用阶段，离大规模应用仍有较大距离。



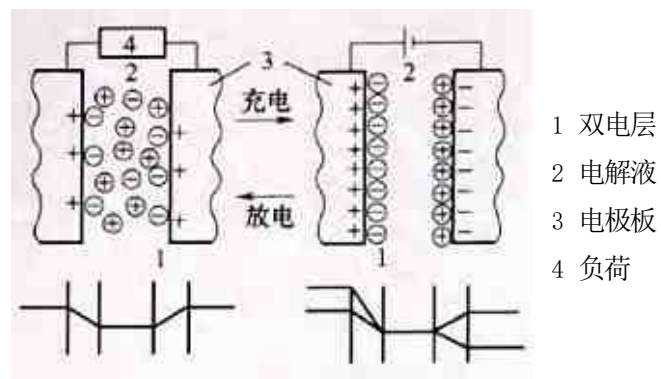
1.3 储能的分类

□ 电气类储能

◆ 超级电容储能

超级电容由活性炭多孔电极和电解质构成，其电容值达法拉级以上。超级电容在储能过程中遵循**电化学双电层理论**，通过电极与电解液形成的界面双电层来**收藏电荷**，从而**将电能储存于电场中**。

超级电容储能充电速度快，功率密度高，对环境温度适应力强，对环境友好，但其续航能力较差，且依赖新材料的发展。目前，超级电容储能通常应用于提高电能质量等场合。



1.3 储能的分类

□ 电化学储能

电化学储能通过电化学反应实现**电能与化学能之间的相互转换**。根据温度的差异，电化学储能可分为**室温电池**和**高温电池**两类。其中，室温电池主要包括**铅酸电池**、**锂离子电池**和**液流电池**；高温电池主要为**钠硫电池**。

一般认为，电化学储能的**投资成本低于250美元/kWh**、**储能寿命超过15年**（**4000个充放电次数**）和**储能效率高于80%**时具有较大的规模化应用前景。目前，**铅酸电池和锂离子电池已实现了大规模产业化**，特别是高比能锂离子电池在**电动汽车领域**得到了广泛应用。



1.3 储能的分类

□ 电化学储能

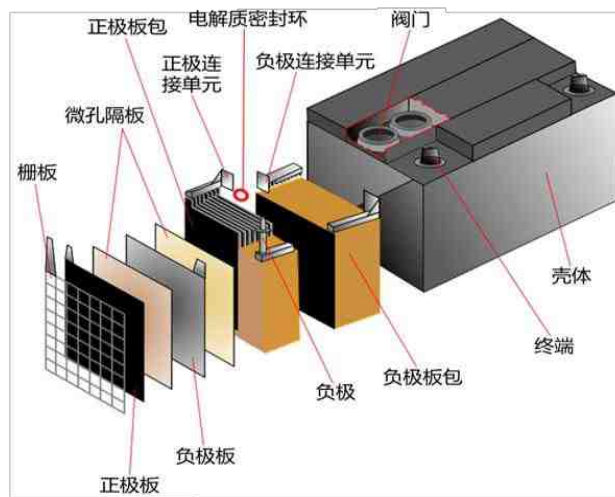
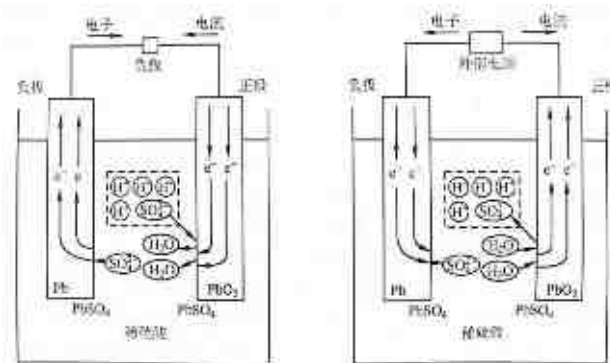
◆ 铅酸电池

铅酸电池是利用**铅在不同价态之间的固相反应**来实现充放电。**传统的铅酸电池**的电极

由铅及其氧化物制成，电解液为硫酸溶液。

超级铅酸电池通过超级电容器的活性炭电极材料形成双电层储能机制，可以**改善铅酸电池的倍率放电性能，延长其脉冲放电寿命，提高其接收电荷的能力。**

铅酸电池安全可靠，价格低廉，性能优良等优点，是目前应用最为广泛的电池之一。然而，铅是非环保材料，需要回收利用。



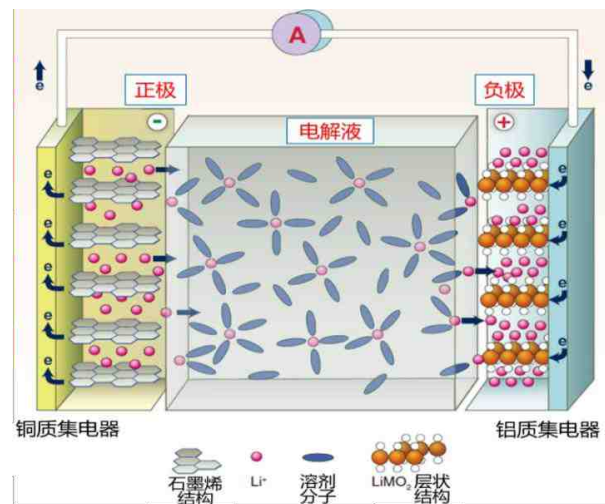
1.3 储能分类

□ 电化学储能

◆ 锂离子电池

锂离子电池是一种二次电池（充电电池），主要依靠锂离子在正极和负极之间的移动进行能量存储与释放。充电时，正极的锂原子变为锂离子，通过电解质向负极移动，在负极与外部电子结合后还原回锂原子进行存储；放电过程正好与此相反。

锂离子电池的能量密度高，自放电率低，寿命长，且无记忆效应，易于快充快放，但成本偏高。随着技术的发展以及成本的下降，近年来锂离子的应用规模越来越大，前景被广泛看好。



1.3 储能的分类

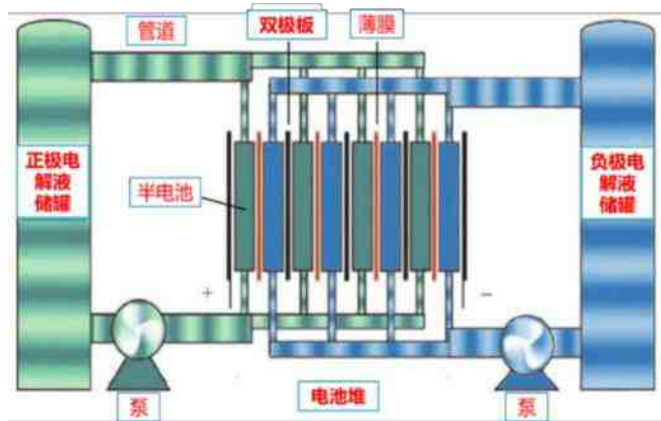
□ 电化学储能

◆ 液流电池

液流电池全称为氧化还原液流电池，其工

作原理是：先将活性物质溶解于正负储液罐的溶液中，利用送液泵使电解液不断循环，并在正负极发生氧化还原反应，从而实现电池的充电和放电。

液流电池具有寿命长、自放电率低、环境友好和安全性高等优点，缺点是能量效率和能量密度都不高。目前，全钒液流电池、锌溴液流电池等已初步实现了商业化应用。



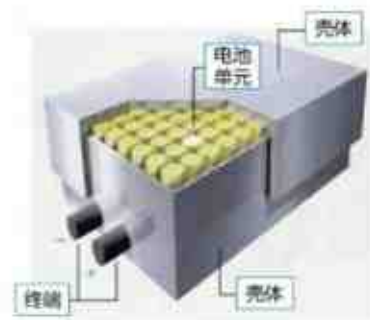
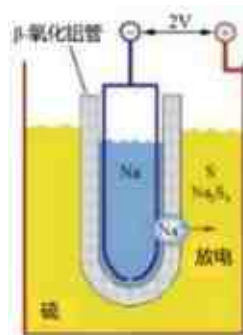
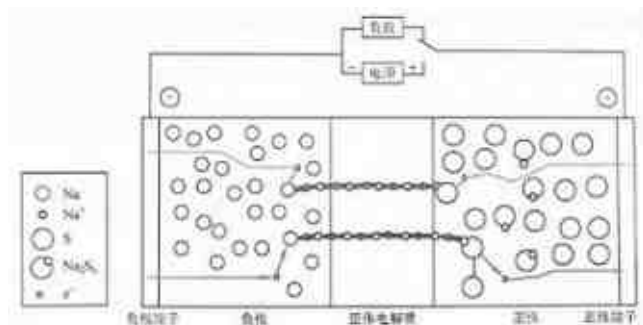
1.3 储能的分类

□ 电化学储能

◆ 钠硫电池

钠硫电池是一种以熔融金属钠为负极，以熔融态的硫为正极和以陶瓷管为电解质隔膜 的熔融盐二次电池。通过**钠与硫的化学反 应**将电能储存起来；用能时再将化学能转 化成电能并释放出去。

钠硫电池具有体积小、容量大、寿命长、效率高和稳定性较强等优点，但其运行温度在**300°C**以上，需满足严格的操作和维护 要求。目前，钠硫电池主要应用于电网削 峰填谷和大规模可再生能源并网、辅助电 源等领域。



1.3 储能的分类

□ 热储能

热储能即储热技术，有**两个关键环节**和**三种主要存储方式**。

◆ 两个关键环节

其一是**热能的传递**，即如何选用合适的传热工质和换热器结构，使得储热系统能够高效地在热能富余时从热源吸热，而在热能短缺时向负载供热；

其二是**热能的储存**，即如何选取合适的储热材料及盛放储热材料的容器，使得整个储热系统不仅能够在大量充、放热的交替过程中保持性能的稳定，而 且在储存过程中能够将热能损失降到最低。

◆ 三种主要存储方式

储热主要有三种方式：**显热储热**、**潜热储热**（也称为**相变储热**）和**热化学储热**。

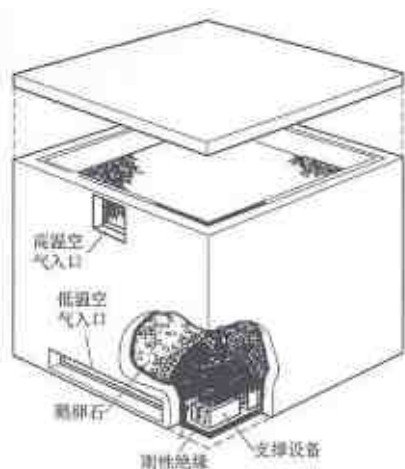
1.3 储能的分类

□ 热储能

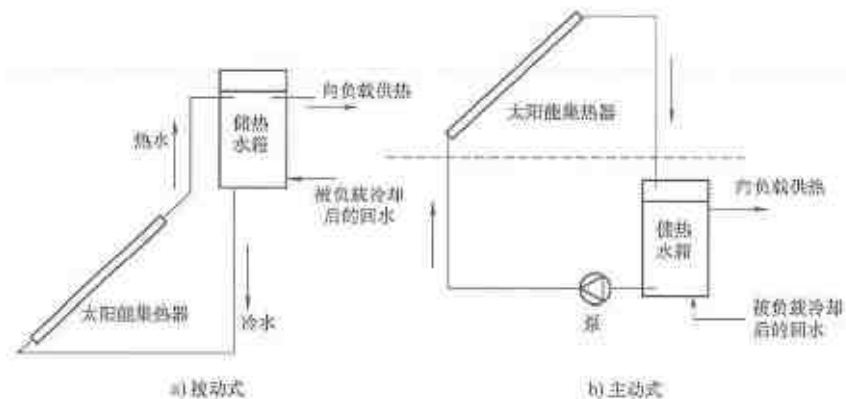
◆ 显热储热

显热储热主要利用储热材料温度的变化来进行热量存储与释放。按储热材料的差异，显热储热可分为固体显热储热和液体显热储热两种。

显热储热是发展最早、技术最成熟和应用的最多的储热方式之一，但也存在储能密度低、储能时间短、温度波动范围大及储能系统规模过于庞大等缺点。



固体显热储热的应用场景：填充床储热



液体显热储热的应用场景：水箱储热

1.3 储能的分类

□ 热储能

◆ 潜热储热

潜热储热是利用物质在凝固/熔化、凝结/气化、凝华/升华等过程中需要吸收或放出相变潜热的原理进行储热，也称为相变储热。相变分为

“固—液”、“液—气”、“气—固”及“固—固”等形式，其中“液—固”相变最为常见。

潜热储热有着较高的储热密度和稳定性。适用于中低温的相变材料有冰、石蜡等，典型应用场景包括废热回收、太阳能供暖和空调系统等；适用于高温的相变材料有高温熔化盐类、混合盐类和金属及合金等，典型应用场景包括热机、太阳能光热电站、磁流体发电以及人造卫星等。



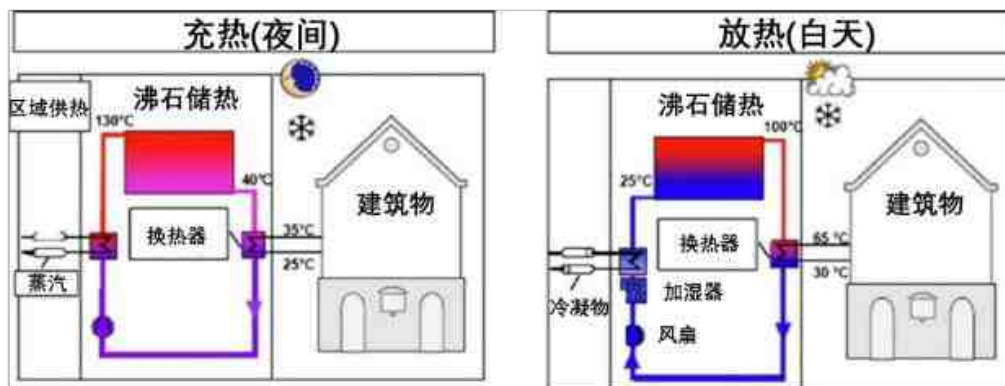
1.3 储能的分类

□ 热储能

◆ 热化学储热

热化学储热技术通过可逆的化学吸附或化学反应存储和释放热能。热化学储热的密度远高于显热储热和相变储热，既可以对热能进行长期储存，还可以实现冷热的复合储存，且热量损失小。

热化学储热在余热/废热回收等领域都得到了应用，但尚未实现商业化。从长远看，热化学储热技术是储热技术的重要发展方向。



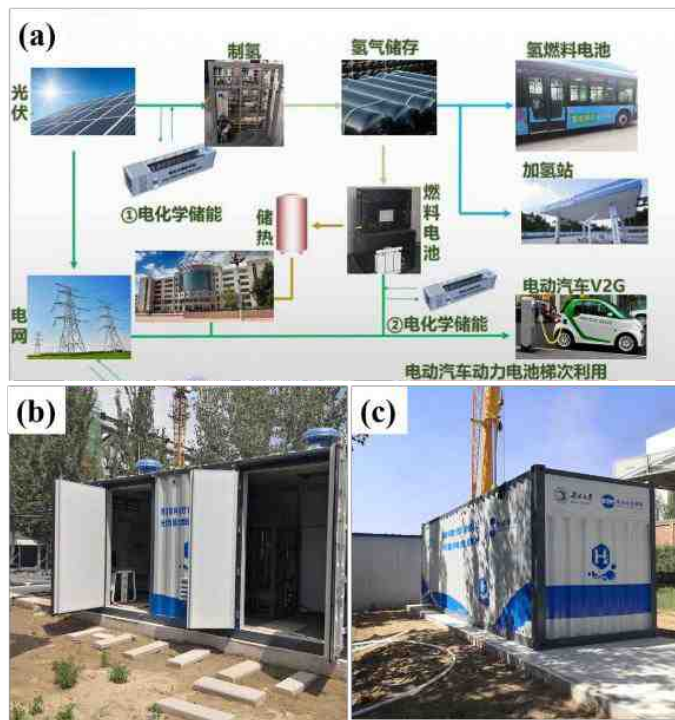
用于区域供热和制冷的热化学吸附储热系统

1.3 储能的分类

□ 氢储能

氢储能的基本原理是将水电解得到氢气，并以**高压气态**、**低温液态**和**固态**等形式进行存储。

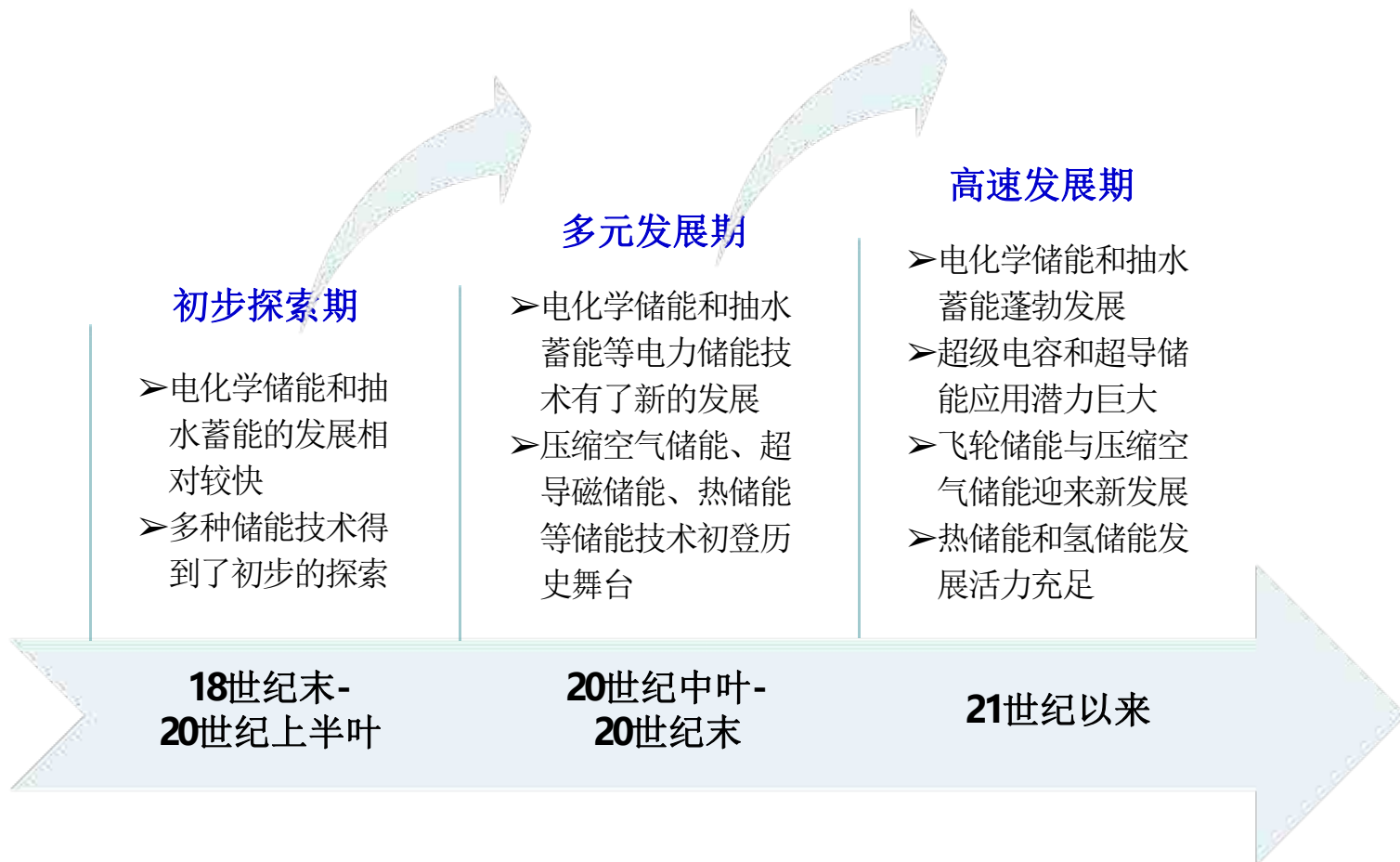
氢气具有燃烧热值高、大规模存储便捷、可转化形式广和环境友好等优点，受到了能源行业的高度重视，**具有极大的发展潜力**。其缺点是能量转换率相对较低，且目前的氧储能技术的成本仍然比较高，这也在一定程度上阻碍了氢储能技术的规模化应用。



光伏电解水制氢-储氢-氢能综合利用示范系统

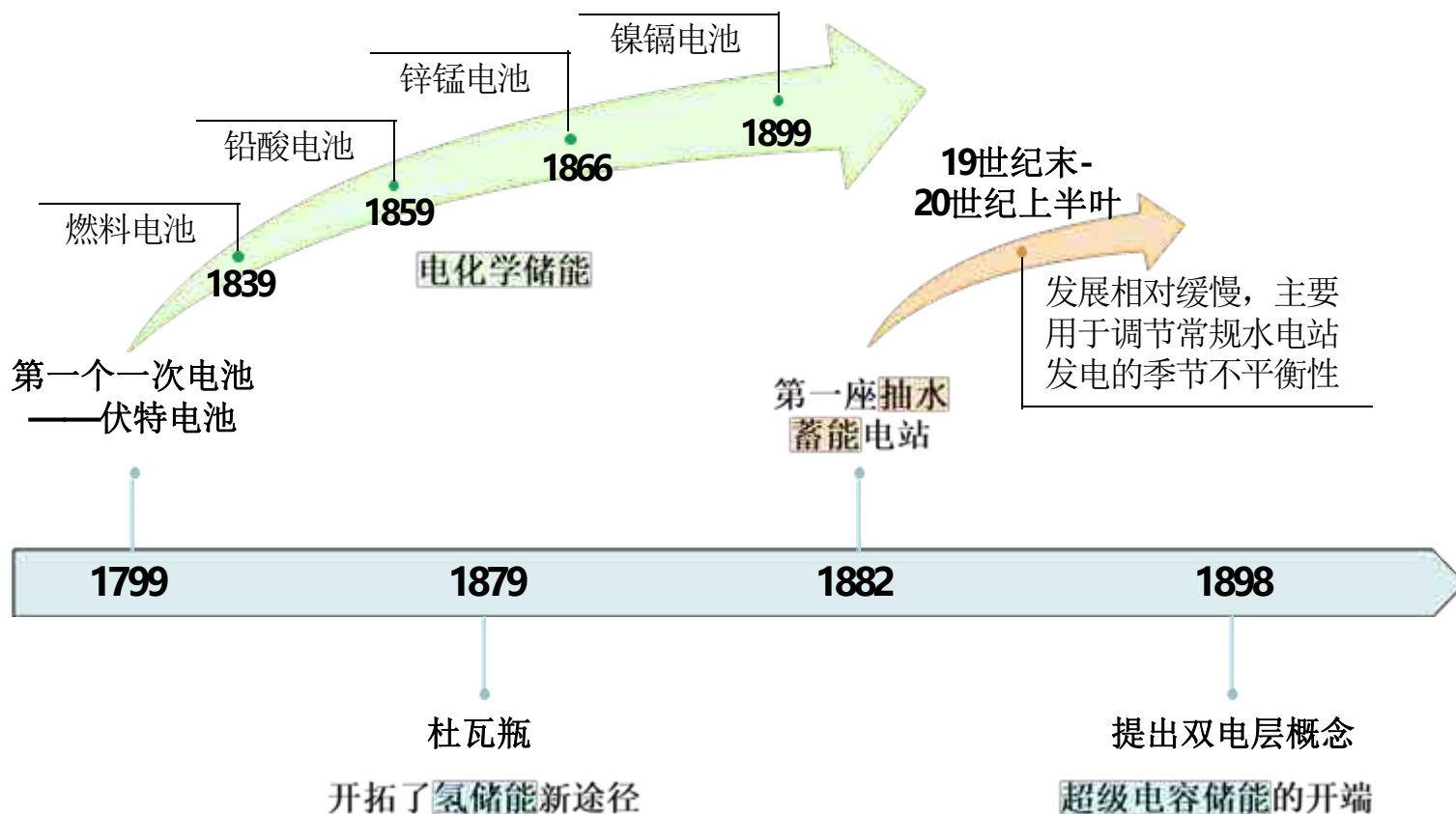
1.4 储能发展简史

根据各历史阶段储能的使用特点，可以将整个储能发展历史大致分为三个时期，即**初步探索期**、**多元发展期**和**高速发展期**。



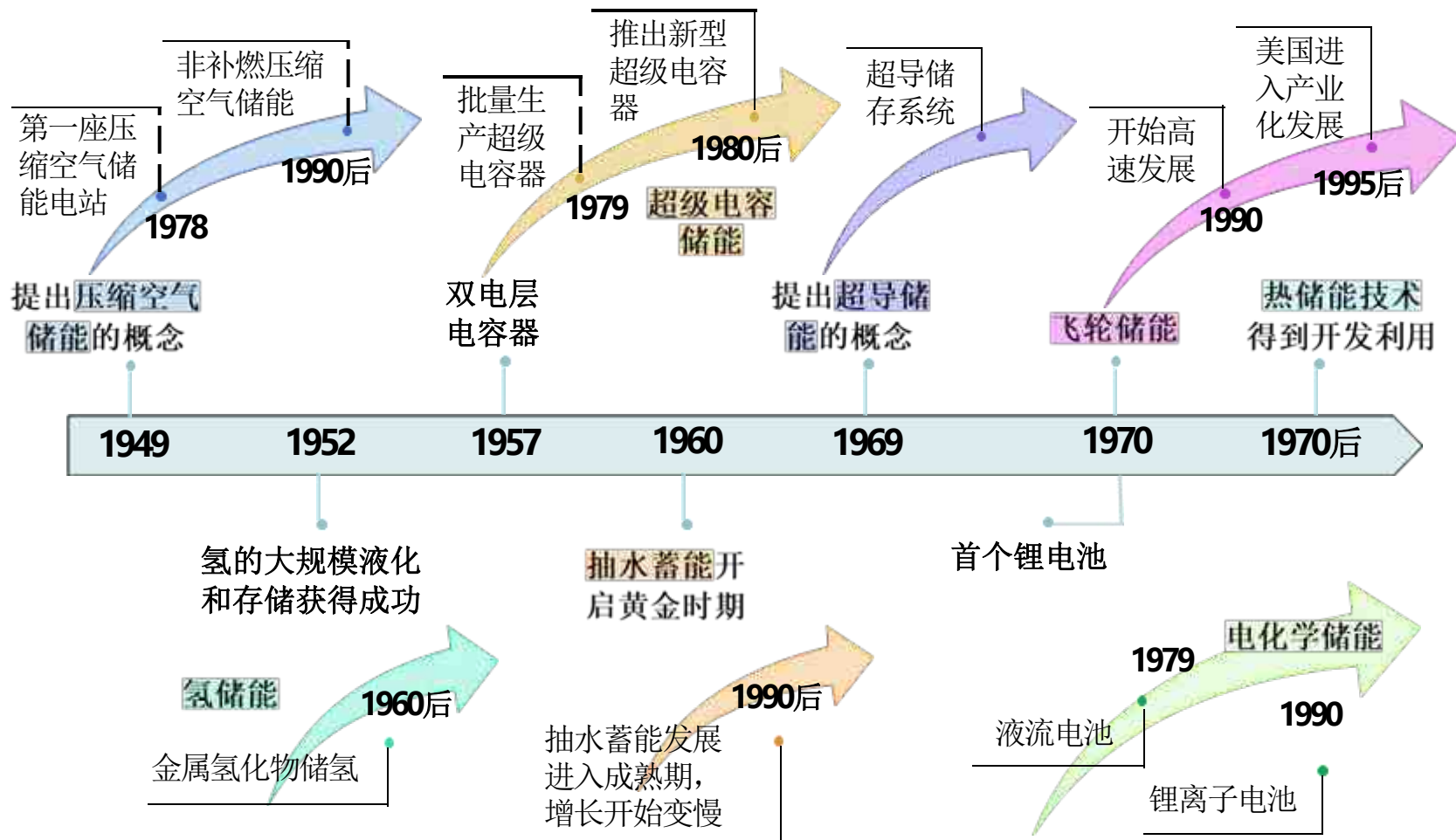
1.4 储能发展简史

◆ 初步探索期（18世纪末-20世纪上半叶）



1.4 储能发展简史

◆ 多元发展期（20世纪中叶-20世纪末）



1.4 储能发展简史

◆ 高速发展期（21世纪以来）

21世纪以来，**能源与环境**成为世界的两大主题，储能也迎来了前所未有的发展良机。此外，**科学技术的发展**大大推动了储能技术的进步。

➤ **电化学储能**：更环保、性能和寿命更高、向小、轻、薄方向发展

➤ **抽水蓄能**：新能源发展带来的调峰调频需求使抽水蓄能装机容量增加

➤ **超级电容储能**：作为蓄电池的辅助电源而在电动汽车领域得到应用

➤ **超导储能**：低温超导储能系统商品化，高温超导储能系统被日益重视

➤ **飞轮储能**：在风力发电平滑、分布光伏发电波动调控的应用前景良好

➤ **压缩空气储能**：发展出多种非补燃压缩空气储能技术，形成示范电站

➤ **热储能**：潜热储热和热化学储热提高了储热密度，具有广阔应用前景

➤ **氢储能**：氢燃料电池技术越发被重视，氢储能的发展前途无量

1.5 未来储能发展动向

◆ 成熟的交易机制与商业模式将促使储能由强配转向主动发展

受储能成本、寿命等因素影响，储能实现商业化发展仍存在一定挑战，储能配置仍以政策驱动为主。随着储能成本的下降、寿命的提高以及交易机制的完善

和商业模式的成熟，储能的收益将得以凸显，储能将由强配转向主动发展。

◆ 能源转型呼唤更高比例、更具价值的储能系统

随着越来越多的可再生能源并网发电，高比例的储能必不可少。在电力系统内部，储能需要将电网、负荷、光伏电站、风场紧密连结，实现“源网荷储一体化”和“风光水火储一体化”两个“一体化”；在不同行业之间，储能也有利于实现能量在交通、制造、建筑等各个行业的优化整合，实现能源在不同行业与环节的相互转化与互补互济，提升能源的价值。

1.5 未来储能发展动向

◆ 新基建时代将赋予储能系统更丰富的内涵

储能技术可广泛应用于5G基站建设、特高压、城际高速铁路和城市轨道交通、新能源汽车充电桩、大数据中心、人工智能、工业互联网等领域，是新基建不可或缺的重要保障。反之，新基建的发展也将给储能的发展带来了新的机遇，赋予储能系统更丰富的内涵。

◆ 共享储能将使储能的应用更为便捷与高效

对于储能而言，共享经济同样有望发挥巨大作用。一方面，不同新能源场站或用户对储能资源的需求具有时间上的互补性，通过共享储能可以显著提高储能资源利用率；另一方面，分散在电网中的储能资源具有空间上的互补性，通过就近调用储能资源，可以有效降低网损，提高系统运行的经济性；此外，共享储能以联盟形式参与电网运行和进行投资决策时，还可以凭借规模效应获得更多的服务定价收益和政策激励收益，进一步提升储能的经济性。

1.6 我国储能现状及挑战

□ 我国储能现状

目前，储能产业在我国还处于发展的初级阶段，储能的商业模式还未成熟，价格机制相对缺乏，但随着新能源的快速发展，我国的储能市场潜力巨大，有可能成为全球最大的储能市场。



2015-2020年中国储能项目累计装机规模

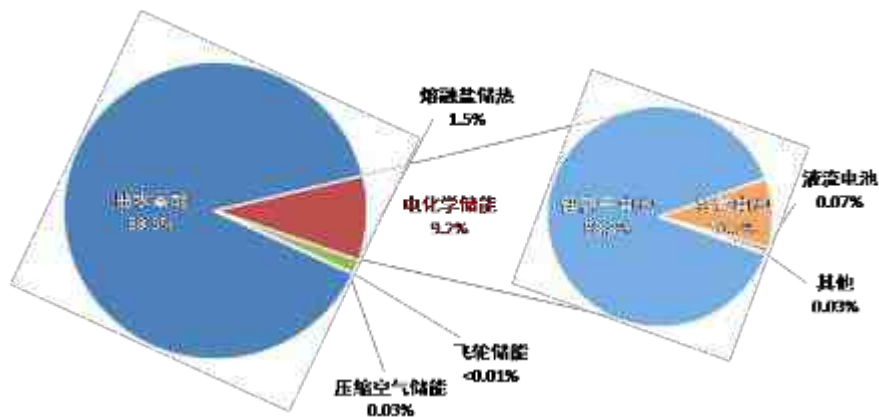


2015-2020年中国电化学储能项目累计装机规模

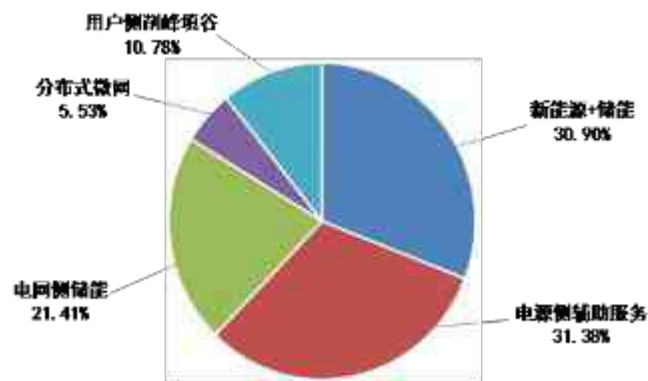
结论：我国储能项目累计装机规模保持逐年增长，2020年达到了35.6GW，同比增长9.88%。其中，电化学储能项目的发展最为迅速，2020年达到了3269.2MW，同比增长91.23%，新增装机规模首次突破1GW大关。

1.6 我国储能现状及挑战

□ 我国储能现状



2020年中国储能市场累计装机规模分布情况



2020年中国电化学储能应用场景

结论1：从我国储能市场累计装机规模分布情况上看，抽水蓄能的占比最大，为89.3%；电化学储能位列第二，其中的锂离子电池的累计装机规模占比最大。

结论2：中国电化学储能在电源侧辅助服务、新能源与储能联合运行两方面的应用最广，而在分布式微网中的应用最少。

1.6 我国储能现状及挑战

□ 我国储能的挑战

- ◆ **储能缺乏长效机制：**一是储能市场仍以政策驱动为主，缺乏配套的使用细则 和行为规范等制度；二是我国电力市场仍处于电力市场建设的初始阶段，缺 少针对性的储能交易品种和机制，盈利模式不够清晰。
- ◆ **储能的技术和非技术成本过高：**一方面受储能原材料、技术发展水平等限制；另一方面受国内储能电站建设、并网验收、融资等环节影响。
- ◆ **储能的标准体系尚未完善：**储能的种类较多，应用场景多样，尚未形成相应 的标准体系，影响行业快速良性发展。
- ◆ **储能的系统集成技术不够成熟：**储能行业存在非专业集成、非一体化设计、未全面测试验证等问题，系统拼凑现象严重，不仅造成系统效率低下，还暗 藏安全隐患。

1.6 我国储能现状及挑战

□ 应对挑战的措施

- ◆ **加强国家规划对于储能行业发展的引领作用：**明确储能行业发展目标、重点任务及实施路径，科学指导储能产业健康有序发展。
- ◆ **提高各省区政策的稳定性和可持续性：**提高政策的稳定性和可持续性，才能让投资者从“快进快出”转向长远发展，从而稳步推动储能的规模化应用。
- ◆ **建立更为完善的储能价值评价体系：**建立更多元化的储能价值评价体系，并针对不同的储能应用场景，在电厂、电网、电力用户乃至社会团体和政府之间的分摊机制，为储能价值的量化评估与成本分摊提供依据。
- ◆ **建立储能市场机制：**理顺储能的市场机制和电价机制，形成更为成熟的储能商业模式，提高储能的盈利能力，从而促进储能的规模化应用。
- ◆ **加快建立储能技术及应用标准体系：**加快储能标准的制定工作，紧跟国际标准的步伐，在国际标准中争取更多话语权，争取将我国的技术、示范项目技术成果纳入国际标准中，避免出现标准滞后于市场的现象。

1.7 本书主要内容

- ◆ 本书按照储能的“本体技术—集成技术—工程应用”思路进行阐述。
- ◆ 第2-7章依次介绍抽水蓄能、压缩空气储能、电化学储能、氢储能和储热等储能技术。
- ◆ 第8章主要介绍了储能电站的运行控制，包括储能集成的主要模式、基本原理、运行控制方法等加快建立储能技术及应用标准体系。
- ◆ 第9章介绍了储能经济性分析的基本原理、储能在电力系统中应用的经济性分析方法以及储能梯次利用的基本原理与方法。

总结与展望

- 广义的储能包括一次能源、二次能源和热能等各种形式的能量的存储；
- 狭义的储能是指利用机械、电气、化学等的方式将能量存储起来的一系列技术和措施，通常指储电、储热和储氢；
- 储能是现代电网、可再生能源高占比系统、新能源电动汽车、“互联网+”智慧能源的重要组成部分和关键支撑技术；
- 储能根据不同载体技术类型可分为机械类储能、电气类储能、电化学储能、热储能和氢储能五大类；
- 储能技术已经历了初步探索、多元发展和高速发展三个历史时期；
- 我国储能产业还处于发展的初级阶段，我们需要认清挑战，解决问题；
- 未来几十年，全球对于新能源的布局会给储能带来非常大的应用空间。

第2章 抽水蓄能

- 抽水蓄能电站概述
- 抽水蓄能电站的原理
- 抽蓄机组的运行模式
- 抽水蓄能电站的应用案例
- 总结与展望

2.1 抽水蓄能电站概述

□ 抽水蓄能电站的基本概念

抽水蓄能是一种以水为能量载体，通过抽水和放水过程实现能量存储和利 用的储能技术。

抽水蓄能电站，一般由上水库、输水系统、厂房和下水库等组成。抽水蓄能电站的上水库用于储蓄能量。下水库用于储蓄上水库发电过程放下来的水。输水系统是电站储蓄的水在上水库与下水库之间双向流动的传输通道。



2.1 抽水蓄能电站概述

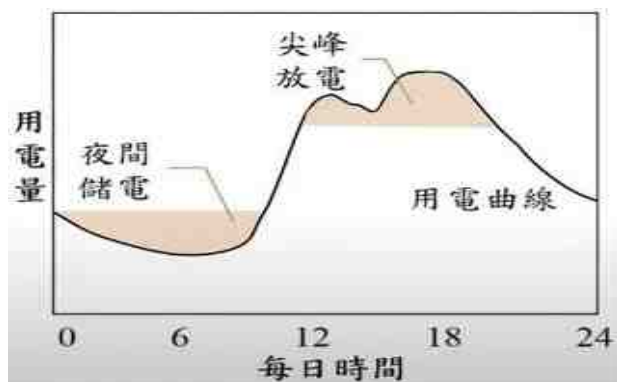
□ 抽水蓄能电站的作用

抽水蓄能电站可有效调节电力系统的供需，使其达到动态平衡，大幅度提高电网的运行安全和供电质量。具体作用包括**削峰填谷**、**调频**、**调相（调压）**、**事故备用**和**黑启动**等。

◆ 削峰填谷

在用电负荷**高峰**时段向电网**提供电能**；

在用电负荷**低谷**时段**消纳**电网中其他电源（如火电、风电和太阳能等）过剩的电量。



2.1 抽水蓄能电站概述

□ 抽水蓄能电站的作用

◆ 调频

抽水蓄能电站的调频作用又称**负荷自动跟踪**作用。抽水蓄能电站具有**启停速度快**、工况转换迅速能随时并迅速地**调整出力**以消除功率的不平衡量，实现频率稳定。

◆ 调相

抽水蓄能电站的调相作用又称为**调压**作用。抽水蓄能发电机的调相运行方式可分为**调相运行**和**进相运行**两种。

- **调相运行**是指发电机向电网**输送感性无功功率**的运行状态。
- **进相运行**是指发电机**吸收**电网的**感性无功功率**的运行状态。

2.1 抽水蓄能电站概述

□ 抽水蓄能电站的作用

◆ 事故备用

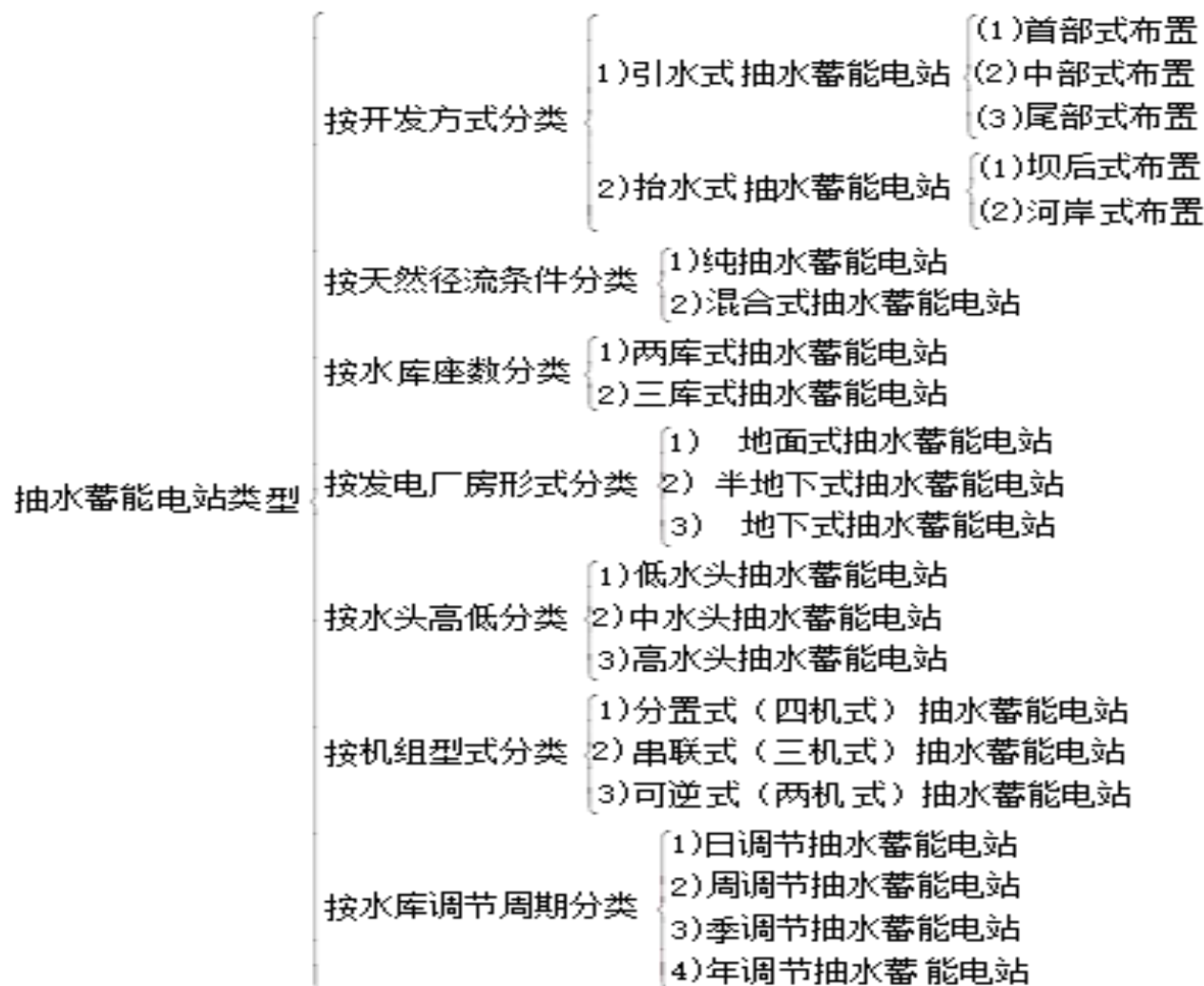
抽水蓄能电站的事故备用作用是指抽水蓄能电站可以作为电力系统中**备用容量**的组成部分之一。

◆ 黑启动

抽水蓄能电站的黑启动作用是指抽水蓄能电站可在**无外界电力供应**的情况下，迅速**自启动**，并为其他机组提供启动功率，使电力系统在短时间内恢复供电，保证电力系统的安全可靠运行。

2.1 抽水蓄能电站概述

□ 抽水蓄能电站的类别及其特点



2.1 抽水蓄能电站概述

□ 按开发方式分类

◆ 引水式抽水蓄能电站：

一般建在天然高度落差较大、流量相对较小的山区或丘陵地区的河流上。根据厂房在输水系统中的位置，可进一步分为首部式布置、中部式布置和尾部式布置三种。

◆ 抬水式抽水蓄能电站：

一般在天然河道中拦河筑坝形成上水库，以抬高上水库的水位。抬水式抽水蓄能电站的布置形式主要分为坝后式布置和河岸式布置。

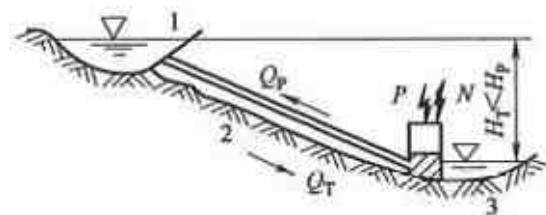


图 2-3 引水式抽水蓄能电站布置图

1—上水库 2—引水道 3—下水库

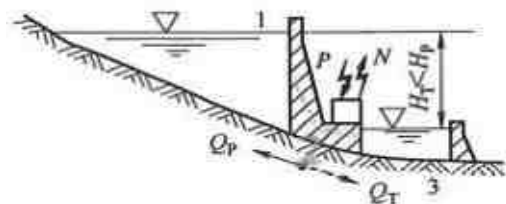


图 2-4 抬水式抽水蓄能电站布置图

1—上水库 2—引水道 3—下水库

2.1 抽水蓄能电站概述

□ 引水式抽水蓄能电站

◆ 首部式布置

首部式布置的抽水蓄能电站将厂房布置在输水系统的上游侧，靠近上水库。常用于水头不太高的电站。

◆ 中部式布置

中部式布置的抽水蓄能电站一般将厂房布置在输水系统的中部。中部地形一般不太高，电站的上下游一般都有比较长的输水道。

◆ 尾部式布置

尾部式布置的抽水蓄能电站一般将厂房布置在输水系统的下游侧，靠近下水库。目前在抽水蓄能电站中应用较多。

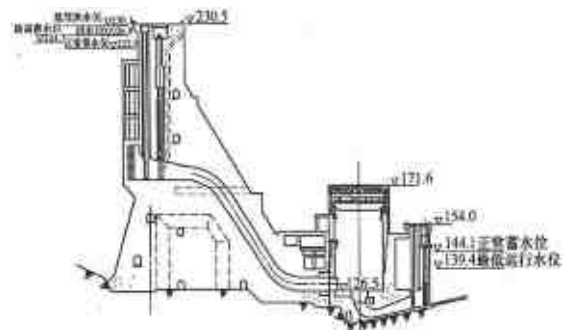
2.1 抽水蓄能电站概述

□ 抬水式抽水蓄能电站

◆ 坝后式布置

坝后式布置的抽水蓄能电站将厂房布置在 **坝的后侧**，一般为地面式，不需承受水压。

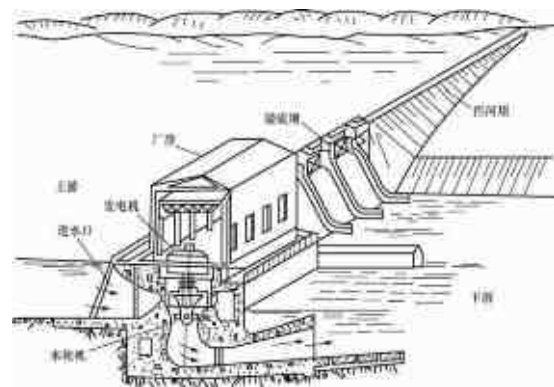
坝后式抽水蓄能电站的**水头一般较低**，但机组安装高程普遍较高。



◆ 河岸式布置

河岸式布置的抽水蓄能电站将厂房布置在 **河岸边或河岸内**。

河岸式布置抽水蓄能电站的引水道多采用 **山体隧洞**；



2.1 抽水蓄能电站概述

□ 按天然径流条件分类

◆ 纯抽水蓄能电站

纯抽水蓄能电站的上水库**一般没有或只有少量的天然来水进入**。纯抽水蓄能电站一般**水头较高**，上水库和下水库常的库容大小相似。

◆ 混合式抽水蓄能电站

混合式抽水蓄能电站的上水库一般建在河川上或利用天然湖泊作为上水库，**具有天然径流汇入**，其来水流量可达到安装常规水轮发电机组承担系统负荷的要求。

混合式抽水蓄能电站又称为**常蓄结合式**抽水蓄能电站。混合式抽水蓄能电站厂房内所**安装的机组**一般由两部分组成，一部分是**常规水轮发电机组**，另一部分是**抽水蓄能机组**。

2.1 抽水蓄能电站概述

□ 按水库座数分类

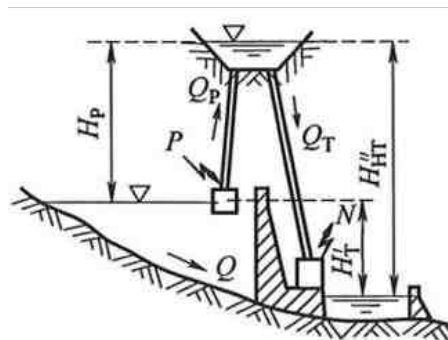
◆ 两库式抽水蓄能电站

两库式抽水蓄能电站指具有**两座水库**的抽水蓄能电站。
两库式抽水蓄能电站是比较**常见**的抽水蓄能电站。

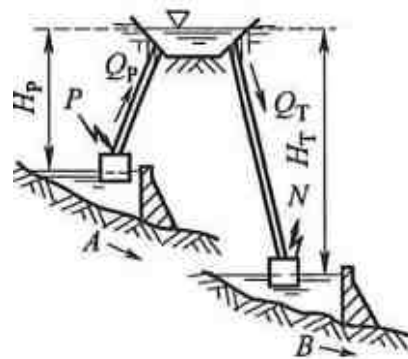
◆ 三库式抽水蓄能电站

三库式抽水蓄能电站是指具有**三座水库**的抽水蓄能电站。三库式抽水蓄能电站一般是由**一座上水库与两座下水库**组成。

当两座下水库是**相邻水电站梯级的两座水库**，可实现**同流域**抽水蓄能；当两座下水库是**相邻流域的两座水电站**，可实现**跨流域**抽水蓄能。



a) 同流域抽水蓄能电站



b) 跨流域抽水蓄能电站

2.1 抽水蓄能电站概述

□ 按发电厂房形式分类

◆ 地面式抽水蓄能电站

地面式抽水蓄能电站采用**地面式厂房**。地面式厂房一般适用于**水头不太高**，下游水位变化幅度不太大和地质条件不宜做地下厂房的抽水蓄能电站，在抽水蓄能电站中**应用较少**。

◆ 半地下式抽水蓄能电站

半地下式抽水蓄能电站采用**半地下式厂房**。半地下厂房能适应抽水蓄能机组较大的淹没深度和下游水位较大的变幅，在抽水蓄能电站中**应用较多**。

◆ 地下式抽水蓄能电站

地下式抽水蓄能电站采用**地下式厂房**。地下厂房由于能够适应尾水位的变化和抽水蓄能机组需要较大淹没深度的要求，在抽水蓄能电站中**应用最多**。

2.1 抽水蓄能电站概述

□ 按水头高低分类

◆ 低水头抽水蓄能电站

低水头抽水蓄能电站水头在**100m**以下。我国的**潘家口抽水蓄能电站**是典型的低水头抽水蓄能电站。

◆ 中水头抽水蓄能电站

中水头抽水蓄能电站水头在**100~700m**之间的抽水蓄能电站称为中水头抽水蓄能电站。我国的**广州抽水蓄能电站**是典型的中水头抽水蓄能电站。

◆ 高水头抽水蓄能电站

高水头抽水蓄能电站水头在**700m**以上的抽水蓄能电站称为高水头抽水蓄能电站。我国的**河北丰宁抽水蓄能电站**是典型的高水头抽水蓄能电站。电站单位kW造价通常随水头的增高而降低，具有较大的经济性。

2.1 抽水蓄能电站概述

□ 按机组型式分类

◆ 分置式(四机式)抽水蓄能电站

分置式抽水蓄能电站在分置式抽水蓄能机组中，水泵、水轮机、电动机和发电机这四种部件是分开布置的，占地大，布置复杂，工程投资大，目前已很少被采用。

◆ 串联式(三机式)抽水蓄能电站

串联式抽水蓄能电站的电动机和发电机功能被集成到同一台机组中，抽水蓄能电机同时与水轮机和水泵相联结，称为串联式机组。串联式机组具有较高的运行效率，但工程投资偏大。

◆ 可逆式抽水蓄能电站

可逆式抽水蓄能电站在串联式抽水蓄能电站的基础上将水泵和水轮机合并为一套，称为可逆式水泵水轮机。可逆式水泵水轮机具有贯流式、轴流式、斜流式和混流式四种结构，可以适应不同应用场景下的水流差异。

2.1 抽水蓄能电站概述

□ 按水库调节周期分类

◆ 日调节抽水蓄能电站

日调节抽水蓄能电站是指以日为循环周期的抽水蓄能电站。目前的大部分纯抽水蓄能电站都属于日调节抽水蓄能电站。

◆ 周调节抽水蓄能电站

周调节抽水蓄能电站是指以周为循环周期的抽水蓄能电站。一般周调节抽水蓄能电站的库容应满足电力系统一周以内对调峰的需求。

◆ 季调节抽水蓄能电站

季调节抽水蓄能电站是指以季为循环周期的抽水蓄能电站。一般季调节抽水蓄能电站的库容应满足电力系统一季度以内对调峰的需求。

◆ 年调节抽水蓄能电站

年调节抽水蓄能电站是指以年为循环周期的抽水蓄能电站。一般年调节抽水蓄能电站的库容应满足电力系统一年以内对调峰的需求。年调节抽水蓄能电站中多数为混合式抽水蓄能电站。

2.2 抽水蓄能电站的原理

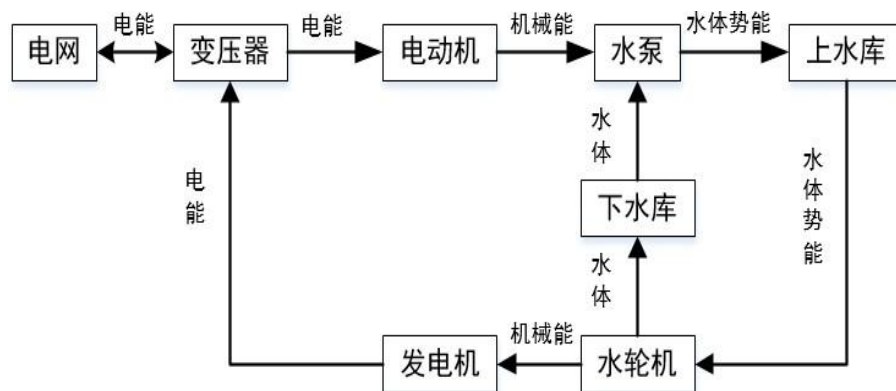
□ 抽水蓄能电站的能量转换过程

➤ 在电力系统负荷低谷时：

将电网过剩的电能先转换为机械能，再把过剩的电能转换而来的机械能以水体的势能形式储存起来；

➤ 在电力系统负荷转为高峰时：

再将这部分水体的重力势能转换为机械能，最后机械能重新转换为电能，以弥补电力系统的尖峰容量和电量不足，满足系统调峰需求。



2.2 抽水蓄能电站的原理

□ 抽水蓄能电站的能量转换过程

◆ 水库水位

- **正常蓄水位**：抽水蓄能电站正常运行情况下，水库蓄水能达到的最高水位。
- **死水位**：抽水蓄能电站正常运行情况下，水库蓄水的最低工作水位。
- **工作深度**：水库的正常蓄水位与死水位之间的高程差（高度落差）。

◆ 水库水头

- **最大水头**：抽水蓄能电站的上、下水库的水面高度落差的最大数值。
- **最小水头**：抽水蓄能电站的上、下水库的水面高度落差的最小数值。
- **平均水头**：取最大水头和最小水头的算术平均值。

◆ 水库库容

- **蓄能库容**：水库在正常蓄水位与死水位之间所包含的库容。上水库与下水库之间的水面高度落差越大（水头越大），存于上水库的能量也越大。

2.2 抽水蓄能电站的原理

□ 抽水蓄能电站的水头特性

抽水蓄能电站的水头特性主要用以描述该电站的**水头值**与**蓄水量**之间的**变化规律**。

在抽水蓄能电站完成一次完整的抽水和发电的循环过程中，**电站水头值**与**蓄水位**将在一个**范围内变化**。

电站的**最大、最小水头**计算公式如下

$$H_{\max} = Z_{\text{UN}} - Z_{\text{LD}}$$
$$H_{\min} = Z_{\text{UD}} - Z_{\text{LN}}$$

	$H_{\max}$	电站的最大水头
	Z_{UN}	上水库的正常蓄水位
	Z_{LD}	下水库的死水位

	$H_{\min}$	电站的最小水头
	Z_{UD}	上水库的死水位
	Z_{LN}	下上水库的正常蓄水位

2.2 抽水蓄能电站的原理

□ 抽水蓄能电站的水头特性

抽水蓄能电站的水头与蓄水位的变化规律主要由**水库形状**以及**库容大小**决定。

假定上水库从**正常蓄水位 Z** 开始放水，当放水量达到 ΔV 时，其水位下降至 Z ；此时，下水库由于接收到 ΔV 的水量，其水位由死水位 Z 上升至 Z 。

LD L1

当上水库的蓄水位下降至**死水位 Z** 后，抽水蓄能电站不再能继续放水发电，下水库的蓄水位也将上升至其正常蓄水位 Z 。此时，抽水蓄能电站的**水头最小**

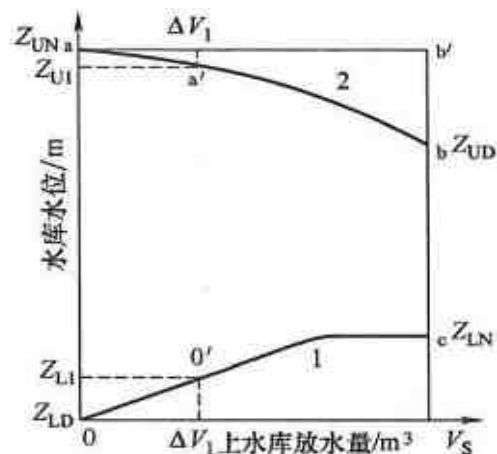


图 2-16 纯抽水蓄能电站的水头变化情况

1—发电过程中下水库的水位变化曲线

2—发电过程中上水库的水位变化曲线

注：抽水蓄能电站的**水头**可通过上水库放水曲线与下水库的蓄水曲线的**垂直距离**表示。

2.2 抽水蓄能电站的原理

□ 抽水蓄能电站的水头特性

对图2-16中同一横坐标的上水库放水曲线与下水库的蓄水曲线取差值，便可制作出图2-17所示的抽水蓄能电站的水头特性。

一般而言，库容越大，水头变化特性曲线就越平缓，反之亦然。

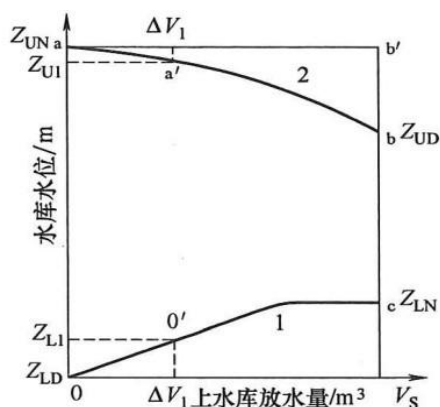


图 2-16 纯抽水蓄能电站的水头变化情况

- 1—发电过程中下水库的水位变化曲线
- 2—发电过程中上水库的水位变化曲线

取差值

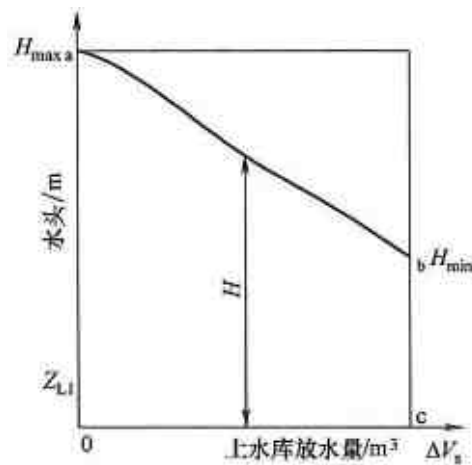


图 2-17 纯抽水蓄能电站的水头特性

2.2 抽水蓄能电站的原理

□ 蓄能水库的能量特性

蓄能水库的能量特性主要用以描述抽水蓄能电站的发电量与上水库蓄能库容的放水量之间的关系。

抽水蓄能电站的主要任务是调峰，因而系统能容纳的调峰容量（功率） N (kW) 或调峰电量（能量） E (kWh) 是决定上、下水库容积的主要依据。

T

在规划选点或可行性研究阶段，蓄能库容 V 可按式估算。

s

$$V_s = 3600hQK = 3600h \frac{N}{9.81\eta_T \bar{H}} K = 367 \frac{E_T}{\eta_T \bar{H}} K (m^3)$$



h	日发电小时数，单位小时	K	损失系数，由水库表面蒸发、
Q	发电流量，单位 m^3/s		水库渗漏和事故库容等因素所确定，
$\bar{H}$	发电平均水头，单位m		数值不小于1。

2.2 抽水蓄能电站的原理

□ 蓄能水库的能量特性

在所能修建的水库的容积无法达到调峰所需蓄能库容要求时，只能按照所能建成的最大库容确定该抽水蓄能电站的调峰能力。

当 $K=1$ ， $\eta_T=85\%$ 时，上水库的放水量 ΔV 与发电量 E_T 的关系式为

$$\Delta E_T = \Delta V \bar{H} \eta_T / (367K) = 0.0023 \Delta V \bar{H} \quad (\text{kWh})$$

在一次完整的放水发电调峰运行过程中，发电量 E_T 为

$$E_T = \frac{V_s \bar{H} \eta_T}{367K} \quad (\text{kWh}) \quad \Rightarrow \quad \left\{ \eta_T \text{ 发电工况的运行效率, 单位}\% \right.$$

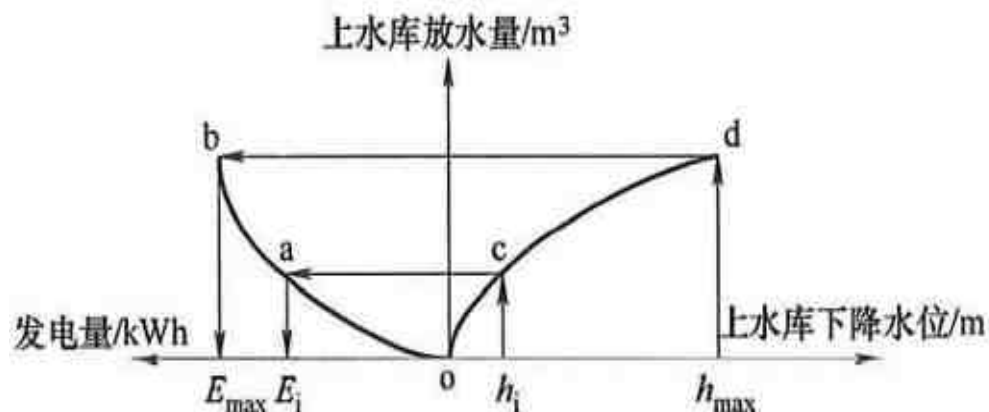


2.2 抽水蓄能电站的原理

□ 蓄能水库的能量特性

利用抽水蓄能电站的**水头-能量特性图**，可求出上水库从某一水位开始放水至另一水位对应的**发电量**。

在抽水蓄能电站运行过程中，可借助蓄能水库的能量特性图**计算**用去的蓄能量和尚存的蓄能量，或用来**预测**发多少电时上水库水位将下降至何处。



2.2 抽水蓄能电站的原理

□ 抽水蓄能电站的综合效率

抽水蓄能电站的综合效率 η （即抽水用电与放水发电的电量转换效率）是衡量抽水蓄能电站调峰循环过程中电量转换效率的一个重要指标。

抽水蓄能电站的综合效率 η 为：

$$\eta = \frac{E_T}{E_P} = \eta_T \cdot \eta_P$$
$$\eta_T = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4$$
$$\eta_P = \eta_5 \cdot \eta_6 \cdot \eta_7 \cdot \eta_8$$



发电工况下的运行效率，
由输水系统、水轮机、
发电机和主变压器的发
电工况运行效率组成。

抽水工况下的运行效率，
由输水系统、水轮机、
发电机和主变压器的抽
水工况运行效率组成。

2 2抽水蓄能电站的原理

□ 抽水蓄能电站的综合效率

抽水蓄能电站综合效率主要由**变压器**、**电动机**、**水泵**、**输水系统**等工作部件的运行效率共同决定。一般情况下，**抽水蓄能电站的容量越大，综合效率就越高。**

对于**中小型**抽水蓄能电站，其综合效率一般为**0.67~0.70**之间；

对于**大型**抽水蓄能电站，其综合效率一般都在**0.7以上**，条件优越的大型抽水蓄能电站的综合效率甚至可以达到**0.78**。

运行工况	抽水工况				发电工况				电站综合效率
工作部件	变压器	电动机	水泵	输水系统	输水系统	水轮机	发电机	变压器	
运行效率	0.995	0.978	0.911	0.979	0.971	0.907	0.976	0.995	0.742

2.2 抽水蓄能电站的原理

例2-1 某抽水蓄能电站上水库水位从正常蓄水位下降到死水位发电时段对映的平均水头 $\bar{H}=500\text{ m}$ ，发电工况的运行效率 $\eta_T=85\%$ ，水库表面蒸发、水库渗漏和事故库容等因素引起的损失系数 $K=1.2$ ，日发电小时数 $h=8$ 小时，发电流量 $Q=6.3 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{s}$ 。请估算抽水蓄能电站的蓄能库容 V_S 、调峰容量（功率） N 和调峰电量（能量） E_T 。

解：由公式(2-3)先求抽水蓄能电站的蓄能库容 V_S ，即



由 V_S 结合公式(2-3)，可反推求出最大调峰容量 N 和调峰电量 E_T ，即

$$N = \frac{9.81 h_T \bar{H}}{3600 h K} V_S = \frac{9.81 \times 0.85 \times 500}{3600 \times 8 \times 1.2} \times 2.17728 \times 10^7 = 2.6266275 \times 10^6 (\text{kW})$$

$$E_T = \frac{h_T \bar{H}}{367 K} V_S = \frac{0.85 \times 500}{367 \times 1.2} \times 2.17728 \times 10^7 = 2.10114 \times 10^7 (\text{kWh})$$

2.3 抽蓄机组的运行模式

□ 抽蓄机组的工况

◆ 静止工况

静止工况指抽水蓄能机组处于停机静止状态。此时，机组可作**静止备用**，以便在电网发生紧急情况下快速投入使用；可对机组安排**检查维修**，提高运行安全性。此外，为了机组安全性，静止工况还可以作为发电工况和抽水工况切换的**过渡状态**。

◆ 发电工况及抽水工况

发电工况指抽水蓄能机组处于发电状态。当电力负荷出现高峰时，抽水蓄能机组运行在发电工况，**向电力系统输送电能**。

抽水工况指抽水蓄能机组处于抽水状态。当电力负荷低谷时，抽水蓄能机组运行在抽水工况，**消纳系统中多余的电能**。

2.3 抽蓄机组的运行模式

□ 调相工况

调相工况指抽水蓄能机组处于调相状态，**与系统进行无功功率的交换**，以调节电网电压。根据机组运行在发电和抽水两种不同的模式可以进一步分为**发电调相工况**和**抽水调相工况**。

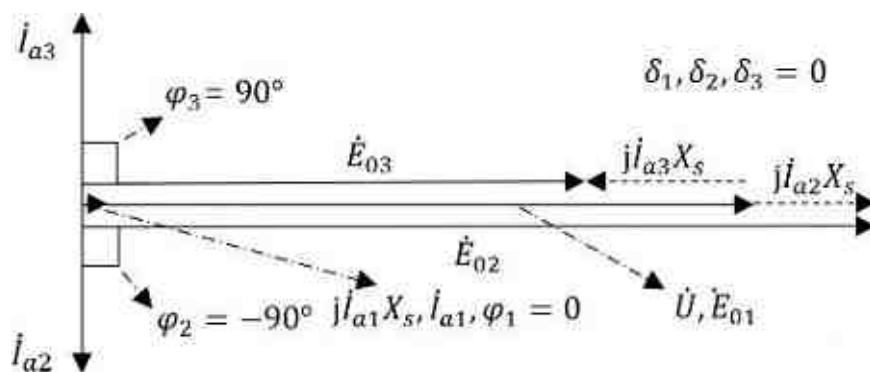
调相工况下机组与电网交换的有功功率，机组输出的有功功率和电磁功率可近似为**0**。从而有

$$\begin{aligned} P &= mUI_a \cos \varphi & P &= 0 \\ P_m &= m \frac{UE_0}{X_s} \sin \delta & P_m &= 0 \end{aligned} \quad \longrightarrow \quad \begin{aligned} I_a \cos \varphi &= 0 \\ E_0 \sin \delta &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{cases} E_0 & \text{空载电势，正比于励磁电流} \\ U & \text{电网电压，保持恒定不变} \\ I_a & \text{定子电流} \\ \delta & \text{功角，} E_0 \text{ 超前 } U \text{ 的角度} \\ \varphi & \text{功率因数角，} U \text{ 超前 } I_a \text{ 的角度} \end{cases}$$

2.3 抽蓄机组的运行模式

□ 机组调相运行向量图



- 初始状态下, $\varphi_1 = 0$, 此时 $\dot{I}_{a1} = 0$, $\dot{E}_{01}$ 和 $\dot{U}$ 重合
- 在初始状态下增加励磁电流, 空载电势增加, 如 $\dot{E}_{02}$ 所示。由相量关系可知, 此时 $\dot{I}_{a2} \neq 0$, $\varphi_2 = 90^\circ$, 此时**机组输出滞后无功功率**。
- 在初始状态下减少励磁电流, 空载电势相应减少, 如 $\dot{E}_{03}$ 所示。类似地, 我们可推知此时 $\dot{I}_{a3} \neq 0$, $\varphi_3 = -90^\circ$, 此时**机组吸收感性无功功率**

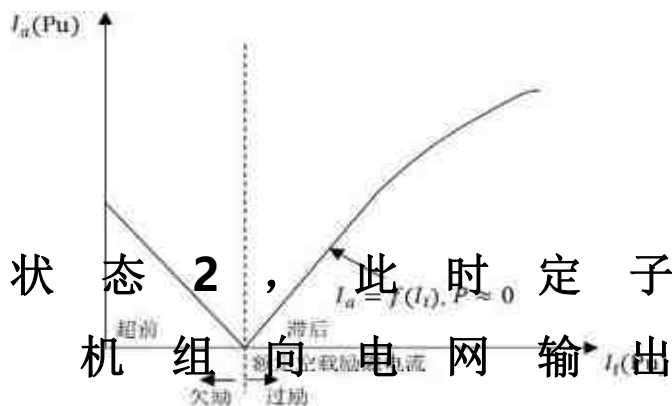
2.3 抽蓄机组的运行模式

□ 机组调相运行V形曲线

➤ V形曲线的最低点对应状态1，此时定子电流为0，机组与电网并未交换无功功率。

➤ V形曲线的右侧对应状态2，此时定子电流滞后电压 90° ，机组向电网输出感性无功功率

➤ V形曲线的左侧对应状态3，此时定子电流超前电压 90° ，机组向电网吸收感性无功功率



调相原理可总结为：增加励磁电流机组输出的无功功率增加（吸收的无功功率减少）；减小励磁电流输出的无功功率减少（吸收的无功功率增加）。

2.3 抽蓄机组的运行模式

□ 发电调相工况与抽水调相工况的区别

◆ 转子转向不同：

转子在发电方向下的转向与抽水方向下的相反。

◆ 保护配置不同

在发电和抽水两种不同的工况下，机组的电压、电流相序相反，因此一些与相位相序有关的保护需要分开配置，如负序过电流保护、相序保护、失磁保护和失步保护等。

◆ 使用频次不同

抽水调相工况作为机组抽水工况起动的一个过渡状态，十分常见。相较之下，发电调相工况仅在电网遭遇紧急情况时才会启用。

2.3 抽蓄机组的运行模式

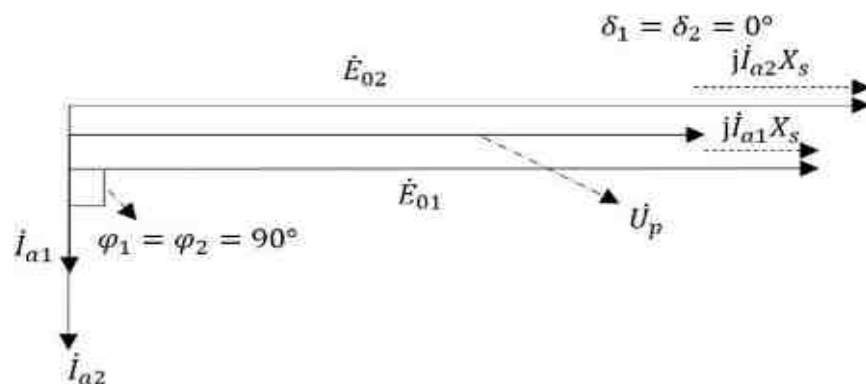
例2-3 今有一抽水蓄能机组运行在调相工况，定子绕组Y接。初始空载电势 $E_{01} = 13\text{kV}$ ，现接到调度指令，将空载电压增加至 $E_{02} = 15\text{kV}$ 。电网线电压 $U_l = 18\text{kV}$ ，机组同步电抗 $X_s = 0.5\Omega$ ，不计电阻压降。试求增发的感性无功功

解：首先求解电网相电压，即

$$U = U_l / \sqrt{3} = 18 / \sqrt{3} = 10.4(\text{kV})$$

由于机组运行在调相工况，无有功功率交换，故： $\delta_1 = \delta_2 = 0^\circ, \varphi_1 = \varphi_2 = 90^\circ$

可做出相量图：



2.3 抽蓄机组的运行模式

由图可得：

$$I_{a1} = \frac{E_{01} - U_p}{X_s} = \frac{13 - 10.4}{0.5} = 5.2(\text{kA})$$

$$I_{a2} = \frac{E_{02} - U_p}{X_s} = \frac{15 - 10.4}{0.5} = 9.2(\text{kA})$$

进一步可算出调整励磁前后机组输出的无功功率为：

$$Q_1 = 3U_p I_{a1} \sin \varphi_1 = 3 * 10.4 * 5.2 = 162.24(\text{MVar})$$

$$Q_2 = 3U_p I_{a2} \sin \varphi_2 = 3 * 10.4 * 9.2 = 287.04(\text{MVar})$$

故增发的无功功率为：

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1 = 287.04 - 162.24 = 124.8(\text{MVar})$$

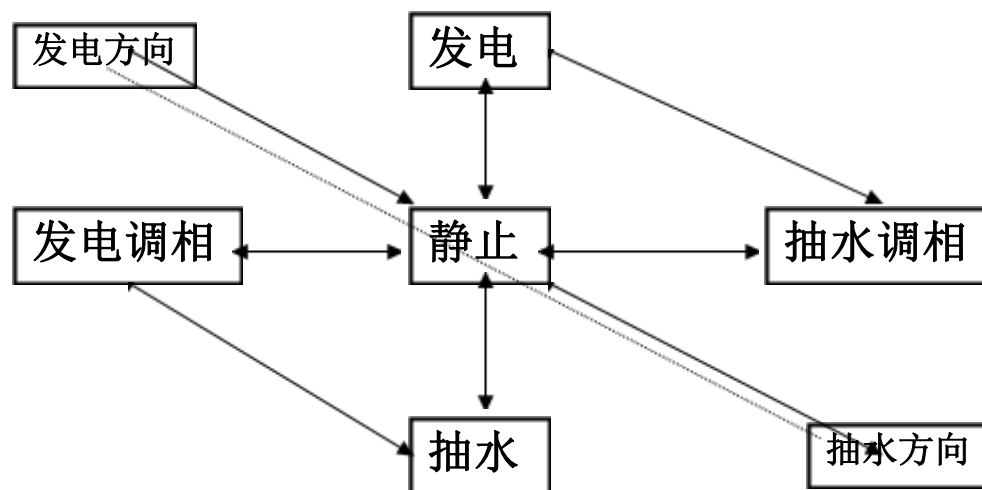
2.3 抽蓄机组的运行模式

□ 抽蓄机组的工况切换

◆ 工况切换方式

常见的工况切换一般的方式有**12**种：

- (1) 静止至发电; (2) 发电至静止; (3) 静止至发电方向调相;
 - (4) 发电方向调相至静止; (5) 静止至抽水; (6) 抽水至静止;
 - (7) 静止至抽水方向调相; (8) 抽水方向调相至静止; (9) 发电至发电方向调相;
 - (10) 发电方向调相至发电; (11) 抽水至抽水方向调相; (12) 抽水方向调相至抽水;
- 水;



2.3 抽蓄机组的运行模式

□ 抽蓄机组的启动

对于四机式和三机式的抽蓄机组，其内部负责抽水和负责发电的结构相对独立，不需要特殊的启动方法。

对于二机式抽蓄机组，由于其使用同一套设备来实现抽水和发电的功能，启动方式十分复杂。因此下面将以二机式抽水蓄能机组为例来介绍抽水蓄能机组的启动方式。

◆ 启动电动机启动

启动电动机启动将专门的启动电动机与抽蓄机组相连接。启动时通过启动启动电动机来牵引抽蓄机组启动。

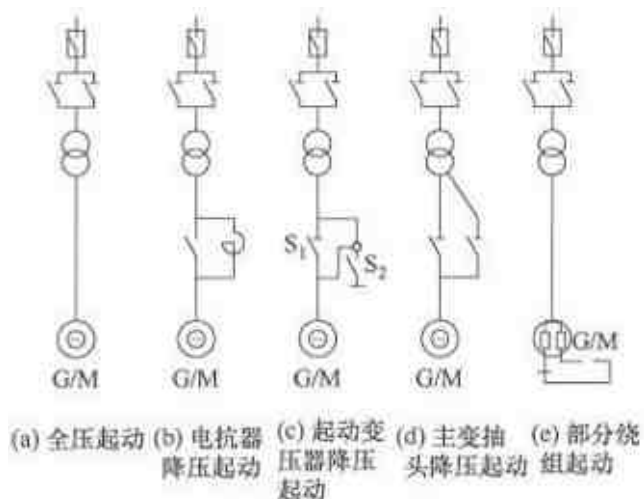
启动电动机启动的接线简单，独立性高；启动电动机不仅可以在启动时提供动力矩，还可以在制动时提供阻力矩；启动电动机需架设在抽蓄机组之上，增加了厂房高度，导致投资增加。

2.3 抽蓄机组的运行模式

□ 异步起动

基本方法：在发电电动机的励磁绕组短接后，给定子绕组通电；在定子绕组产生磁场和转子绕组产生磁场的相互作用下，转子侧将产生异步转矩带动转子加速；

当转子转速达到同步转速时加上主励磁，将电机拉进同步。根据定子绕组所接电压大小可分为**全压起动**，**降压起动**和**部分绕组起动**，如下图所示：



2.3 抽蓄机组的运行模式

□ 异步起动特点

- **全压起动**下定子绕组所接电压为电网电压，转子绕组所受异步转矩较大，**响应快，耗时少**。但在起动初期，**起动电流过大**，不利于机组和电网的安全运行，因此，全压起动**仅适用于起动容量少的机组**，并且要求尽可能减少起动时转子所受阻力。
- **降压起动**下定子绕组所接电压为降压后的电网电压。根据不同的降压原理可分为**电抗器降压起动，起动变压器降压起动，主变抽头降压起动等**。降压起动**起动电流小**，对机组和电网正常运行的影响较小，但起动转矩小，起动过程**耗时长**。
- **部分绕组起动**利用改接定子绕组来降低起动电压，可将其看作一种特殊的降压起动。与降压起动相类似，部分绕组起动**起动电流较小，起动时间延长**。

2.3 抽蓄机组的运行模式

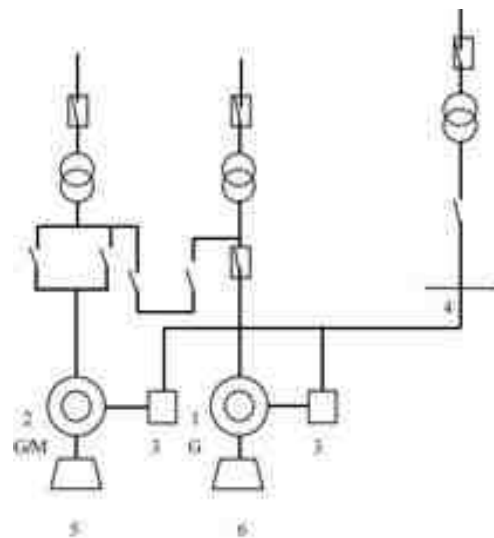
□ 同步起动

同步起动利用频率可变的电流来带动机组起动。根据可变电​​流来源不同可分为**背靠背同步起动**和**静止变频器同步起动**。

◆ 背靠背同步起动

背靠背同步起动的起动电流由另一台发电机提供。起动前，发电机与待起动机组需处于静止状态。起动时，待起动机组在起动电流的作用下逐渐增加至额定转速。当符合并网条件时，将待起动机组并入电网，并切断发电机。

背靠背同步起动的起动电流适用范围广，对电网冲击小；响应慢，耗时较长起动设备简单，但接线复杂



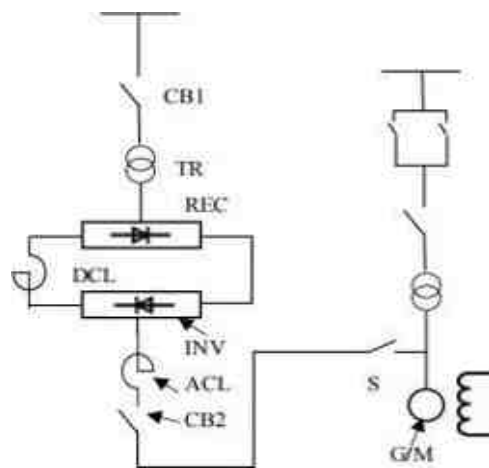
- 1 发电电动机（起动用）
- 2 发电电动机（被起动）
- 3 励磁装置
- 4 厂用电母线
- 5 水泵水轮机（被起动）
- 6 水泵水轮机（起动用）

2.3 抽蓄机组的运行模式

□ 静止变频器同步起动

静止变频器起动的起动电流由电力电子变频电路提供。起动时先闭合开关**S**和断路器**CB2**，接通主励磁回路，再闭合断路器**CB1**，产生频率逐渐上升的电流。在此电流的作用下机组不断加速，符合并网条件后并入电网，并切除变频装置

静止变频器起动具有**耗时短、对系统冲击小、起动成功率高**等优点，是目前抽水蓄能机组的**主流起动方式**



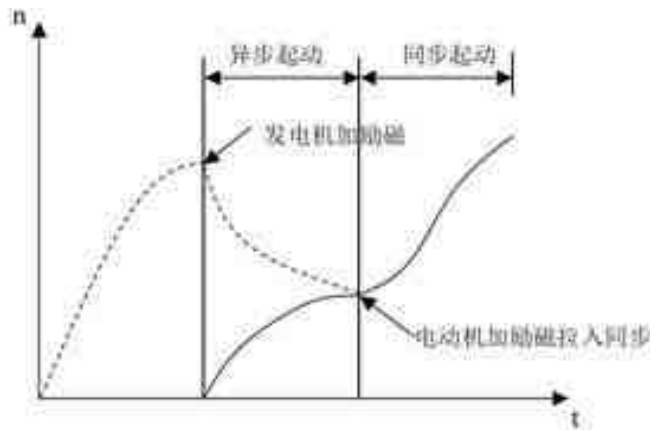
TR-输出变压器 REC-整流器 INV-逆变器
DCL-直流平波电抗器 ACL-交流电抗器

2.3 抽蓄机组的运行模式

□ 半同步起动

半同步起动结合了异步起动和同步起动的特点。半同步起动先起动发电机，为被起动机组提供电压。被起动机组在发电机提供的电压下异步起动，待被起动机组加速到与发电机转速相当时，闭合机组励磁回路，使其以同步起动方式加速到额定转速。

半同步起动的特点与背靠背起动的特点基本相同。但由于异步起动过程的存在，发电机在起动多台机组时无需回到静止状态，因而速动性较背靠背同步起动好。

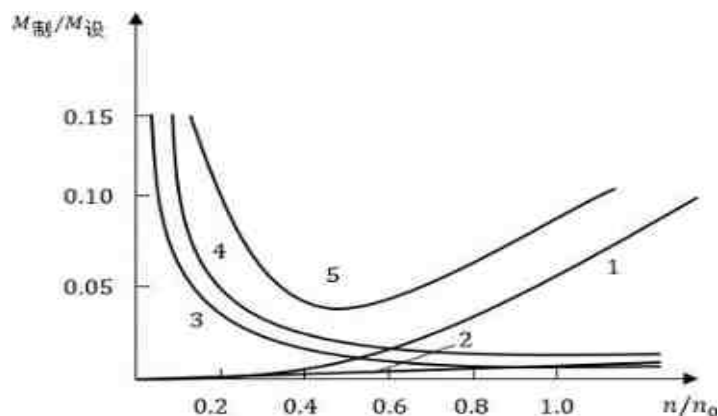


2.3 抽蓄机组的运行模式

□ 抽蓄机组的制动

抽蓄机组从其他工况切换至静止工况时，由于转动部分的惯性较大，依靠机组本来配备的**水力制动**、**风耗制动**和**轴承制动**等机械制动方式难以使机组在 短时间内停转，影响了机组的速动性。因而需要引入电气制动。

◆ 不同制动方法制动转矩对比



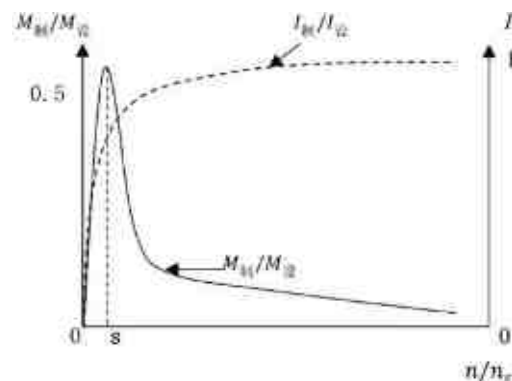
结论：机械制动转矩随着转速下降而减少，而电气制动则相反。这说明了电气制动在低转速下能发挥更大的作用，印证了电气制动的有效性。

2.3 抽蓄机组的运行模式

□ 电气制动的缺陷

➤ 当转速过低时，磁通强度不足，难以在定子侧感应出电流，因此电气制动转矩会急剧下降至零。从而电气制动存在失效点。

➤ 如右图，当转速小于**S**时，随着转速降低，电气制动转矩急剧下降，因此**S**为对应失效点。**S**的计算公式如下：



定子内阻
电机纵轴电抗

$$S = \frac{r}{X_d}$$



$$\left\{ \begin{array}{l} r \\ X_d \end{array} \right.$$

由上式可知，不能通过无限制地增加外接电阻来提高制动转矩，因为这样会导致电气制动会在高转速下失效。

2.3 抽蓄机组的运行模式

□ 抽蓄机组的运行指标

由于抽蓄机组作为抽蓄电站的“心脏”，牵一发而动全身，因此有必要对抽蓄机组的运行状况进行评估。机组的运行指标分为**可用率**和**起动成功率**，下面分别对其进行介绍。

抽蓄机组由不同元件组合而成，故机组可用率可由元件可用率计算得到。下面先介绍元件可用率计算方法，再给出机组可用率计算公式。

◆ 元件可用率

(1) 故障率和故障密度函数：

故障率 $\lambda(t)$ ：元件时刻 t 完好的条件下，在时刻 t 以后单位时间里发生故障的概率。

故障密度函数 $f(t)$ ：元件发生故障的概率密度函数。

2.3 抽蓄机组的运行模式

□ 元件可用率

经推导可得到两者关系为

$$f(t) = \frac{d(1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt})}{dt}$$

特别地，当故障率 $\lambda(t) = \lambda$ 为常数时，有

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

(2) 修复率和修复密度函数：

修复率 $\mu(t)$ ：元件时刻 t 损坏的条件下，在时刻 t 以后单位时间里被修复的概率。

修复密度函数 $r(t)$ ：元件发生故障被修复的概率密度函数。
类似地，当修复率 $\mu(t) = \mu$ 为常数时，两者有如下关系

$$r(t) = \mu e^{-\mu t}$$

2.3 抽蓄机组的运行模式

□ 元件可用率

(3) 平均无故障工作时间:

平均无故障工作时间为故障密度函数的数学期望

$$T_U = \int_0^{\infty} tf(t)dt$$

特别地, 当故障率 $\lambda(t) = \lambda$ 为常数时

$$T_U = \frac{1}{\lambda}$$

(4) 平均修复时间:

平均修复时间是元件修复密度函数的数学期望:

$$T_D = \int_0^{\infty} tr(t)dt$$

类似地, 当修复率 $\mu(t) = \mu$ 为常数时, 两者有如下关系:

$$T_D = \frac{1}{\mu}$$

2.3 抽蓄机组的运行模式

□ 元件可用率

(5) 平均运行时间:

平均运行时间是平均故障时间和平均修复时间之和:

$$T_S = T_D + T_U$$

(6) 元件可用率计算公式

由数理统计相关知识可知, 元件可用率近似等于平均运行时间内平均

无故障工作时间所占比例:

$$A = \frac{T_U}{T_S} = \frac{T_U}{T_U + T_S}$$

特别地, 当故障率和修复率均为常数时, 有

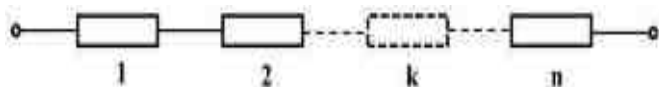
$$A = \frac{\frac{1}{\lambda}}{\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\mu}} = \frac{\mu}{\mu + \lambda}$$

2.3 抽蓄机组的运行模式

□ 元件基本组合方式及其计算公式

◆ 串联组合方式

如图所示，当组成元件中的任意一个变得不可用时，机组也会变得不可用。

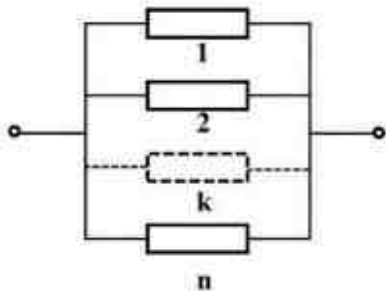


此时组合元件的计算公式为

$$A = A_1 A_2 \cdots A_n \quad A \text{ 元件可用率}$$

◆ 并联组合方式

如图所示，当组成元件中的所有变得不可用时，机组才会变得不可用。



此时组合元件的计算公式为：

$$A = 1 - \overline{A_1} \overline{A_2} \cdots \overline{A_n} \quad \overline{A} \text{ 元件不可用率}$$

2.3 抽蓄机组的运行模式

□ 启动成功率

启动成功率为一段时间内（如一月、一年等），**机组启动成功次数与机组启动总次数的比值**，计算公式如下：

$$S = \frac{N_s}{N_t} = 1 - \frac{N_f}{N_t} = 1 - \frac{N_{gf} + N_{mf}}{N_t}$$

{	N_s	启动成功次数
	N_t	启动总次数
	N_f	启动失败次数
	N_{gf}	发电方向启动失败次数
	N_{mf}	抽水方向启动失败次数

◆ 启动成功率影响因素

- **启动因素**。启动过程中静止变频器的信号传输链路受到外界因素干扰导致启动失败。
- **调相压水因素**。在机组启动初期需要调相压水，压水太过和压水不足都会导致启动失败。
- **设计因素**。随着运行状况不断变化，老式机组往往不能满足运行条件，导致启动失败。

2.3 抽蓄机组的运行模式

□ 可用率与起动成功率的关系

- 过度追求高可用率必然会压缩机组停运检修时间，造成导致起动成功率降低。因此需要平衡好可用率和起动成功率之间的关系，合理安排检修时间。
- 随着监测技术的不断进步，能够更有针对性地对机组进行检修，可以实现可用率和起动成功率的同步提高。

□ 工况切换时间

工况切换时间是机组运行的重要指标。为了减少对电网的影响，工况切换时间要控制的尽量短。但过短的切换时间会对机组造成较大的冲击。

2.3 抽蓄机组的运行模式

例2-4 已知一台机组的故障密度函数 $f(t)$ 服从指数分布 $f(t) = \frac{1}{5}e^{-\frac{1}{5}t}$ ，修复密度函数 $r(t)$ 也服从指数分布 $r(t) = \frac{1}{8}e^{-\frac{1}{8}t}$ ，求解该机组的运行的可用率。

解：根据平均无故障工作时间 T_U 以及平均修复时间 T_D 的定义及计算公式可得

$$T_U = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} t \cdot \frac{1}{5}e^{-\frac{1}{5}t} dt = 5$$

$$T_D = \int_0^{\infty} tr(t)dt = \int_0^{\infty} t \cdot \frac{1}{8}e^{-\frac{1}{8}t} dt = 8$$

再由可用率的计算公式得

$$A = \frac{T_U}{T_D + T_U} = \frac{5}{5 + 8} = 0.385$$

2.3 抽蓄机组的运行模式

注：本题如果积分较难计算，则可用下述方法计算运行可用率

首先由故障密度函数以及连续停运时间的分布可知

$$\lambda = \frac{1}{5}, \mu = \frac{1}{8}$$

进一步由指数分布下故障率、修复率与平均无故障工作时间、平均修复时间的关系可得

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{5}{13} = 0.385$$

2.4 抽水蓄能电站的应用案例

□ 国内典型应用案例

◆ 潘家口混合式抽水蓄能电站在京津唐电网中的应用

1) 电站简介

潘家口混合式抽水蓄能电站位于河北省迁西县境内，电站最大水头**85.7m**，最小水头**36.0m**。

电站的上水库是一个**多年调节水库**，在蓄水发电的同时，还兼顾防洪和向天津和唐山两市供水的任务。下水库属于**日调节水库**。

2) 运行情况

电站的运行采用**常蓄结合**方式，以减少下游需水量对电站发电量的影响。

➤当下游**需水量**小于电站常规发电机组**最低发电用水量**时，**可用抽水蓄能机组抽水补充常规机组的发电用水量**。

➤当下游**需水量**大于电站常规发电机组**最大发电用水量**时，**多出的水量可用于电站的抽水蓄能机组发电**。

2.4 抽水蓄能电站的应用案例

□ 国外典型应用案例

◆ 日本葛野川抽水蓄能电站

1) 电站简介

葛野川抽水蓄能电站是由日本东京电力公司投资修建的**纯抽水蓄能电站**，位于日本山梨县。

上水库的库容为**1120万立方米**；下水库的库容为**1150万立方米**；上、下水库的调节库容均为**830万立方米**。

电站设计的最大水头为**728m**，额定水头为**714m**。

2) 运行情况

葛野川抽水蓄能电站采用**纯抽水蓄能**方式，即在用电低谷时，将下水库的水抽到上水库；在用电高峰时，再将上水库的水放出至下水库来发电。

通过这种方式，可以**削峰填谷**，保证系统稳定运行。

总结与展望

- 抽水蓄能电站是一种特殊形式的水电站，一般由上水库、输水系统、厂房、下水库和开关站等组成。
- 电力系统通过抽水蓄能电站以能量转换的方式，将电能按时间重新分配，从而可以协调电力系统的发电和用电在时间上和数量上的不一致性。
- 抽水蓄能电站集储能与发电两大功能于一体，对电网具有削峰填谷的功能，同时还具有调频、调相(调压)、事故备用、黑启动等功能。
- 抽水蓄能电站的水头特性，就是电站水头值与上水库蓄能库容的放水量间的关系。
- 水库的能量特性，就是电站发电量与上水库蓄能库容的放水量间的关系。

总结与展望

- 利用电站的**水头-能量特性图**，可求出上水库从某一水位开始放水至另一水位止可得到的**发电量**。
- 抽蓄机组的基本工况包括**静止工况**、**发电工况**、**抽水工况**和**调相工况**。其中调相工况可分为**发电调相**和**抽水调相**，两者原理相同，运行特点不同。
- 抽蓄机组常见的工况切换有**12**种方式，其中**起动**和**制动**是工况切换过程中需要重点讨论的问题。
- 二机可逆式机组有**起动电动机起动**、**异步起动**、**同步起动**和**半同步起动**四种方式。制动主要依靠**电气制动**。
- 机组的**可用率**和**起动成功率**是机组运行要求的主要指标，两者是相互联系的；

总结与展望

- 近年来，涌现出了一批**新型抽水蓄能技术**，其中，最具有代表性的 是**变速抽水蓄能技术**和**海水抽水蓄能技术**，它们一定程度上指明了 抽水蓄能技术未来的发展方向。
- **变速抽水蓄能机组**具有自动跟踪电网频率变化和高速调节有功功率等优点。由于可变速机组**可运行水头范围增大**，可以降低上水库大坝高度，节省建设成本。
- **海水抽水蓄能**利用大海作为下水库，电站的建设对环境的影响较小。同时，利用大海作为下水库不仅能够节省下水库的建设费用，而且**不受补水水量的限制**，使得大型抽水蓄能电站选址较容易。

第三章 压缩空气储能

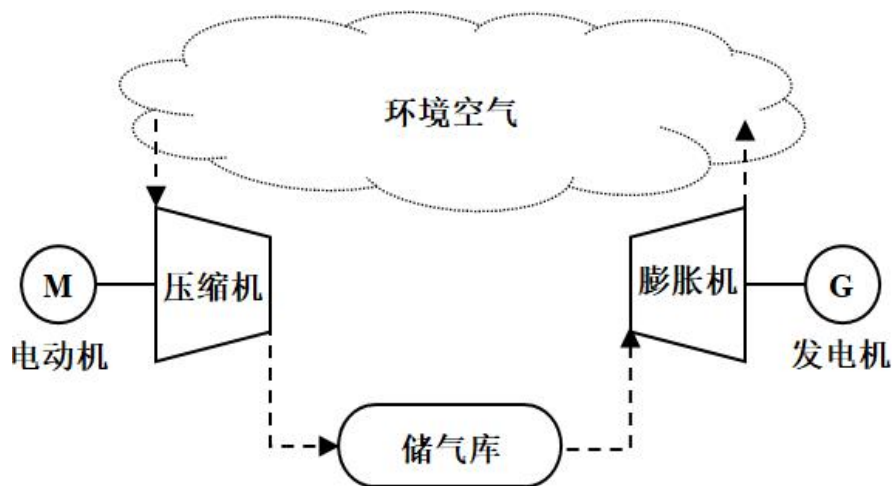
- 压缩空气储能概述
- 压缩空气储能热力学基础
- 先进绝热压缩空气储能
- 压缩空气储能热力学分析
- 压缩空气储能应用案例
- 总结与展望

3.1 压缩空气储能概述

□ 3.1.1 压缩空气储能基本概念

压缩空气储能系统，就是采用**压缩空气**作为能量载体，实现**能量存储和跨时间、空间转移和利用**的一种能源系统，主要可以分为**储能和释能**两个基本工作过程：

- 储能时，电动机驱动压缩机由环境中吸取空气将其压缩至高压状态并存入储气装置，电能在该过程中转化为压缩空气的内能
- 释能时，储气装置中存储的压缩空气进入空气透平中膨胀做功发电，压缩空气中蕴含的内能和势能在该过程中重新转化为电能



压缩空气储能系统基本原理示意图

3.1 压缩空气储能概述

□ 3.1.2 压缩空气储能的作用

➤ 大功率储能

单机功率可达数百兆瓦，并且可在实际运行过程中实现功率的实时调整

➤ 长周期储能

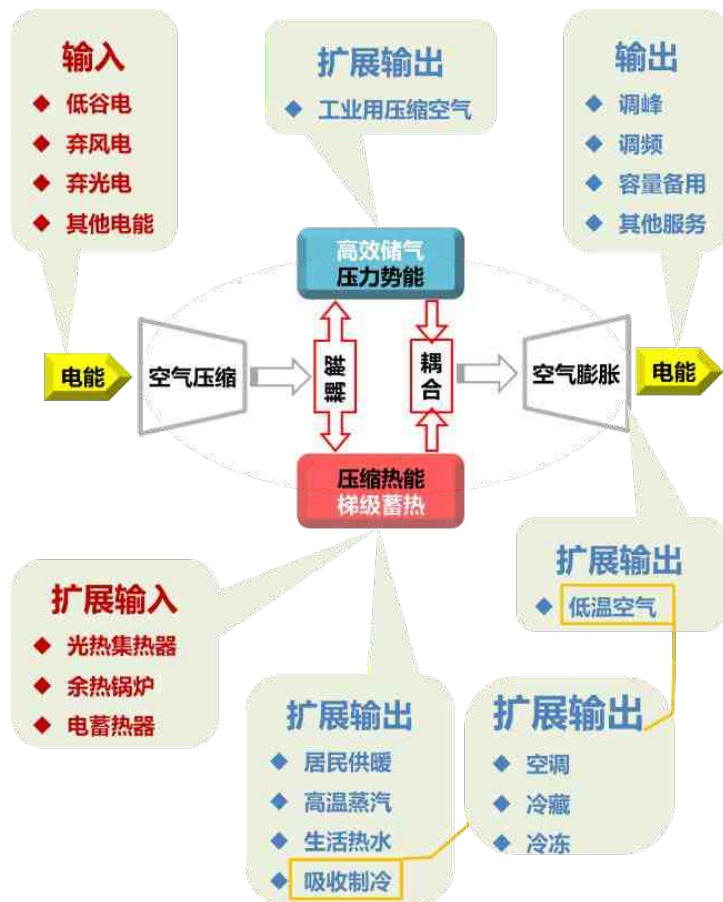
可实现日调度、周调度甚至季调度的长周期储能

➤ 长时间供电

可通过调整输出功率实现长时间供电

➤ 多能联储多能联供

多能联储联供能力，可与光热、地热、工业余热结合，作为清洁能源系统能量枢纽

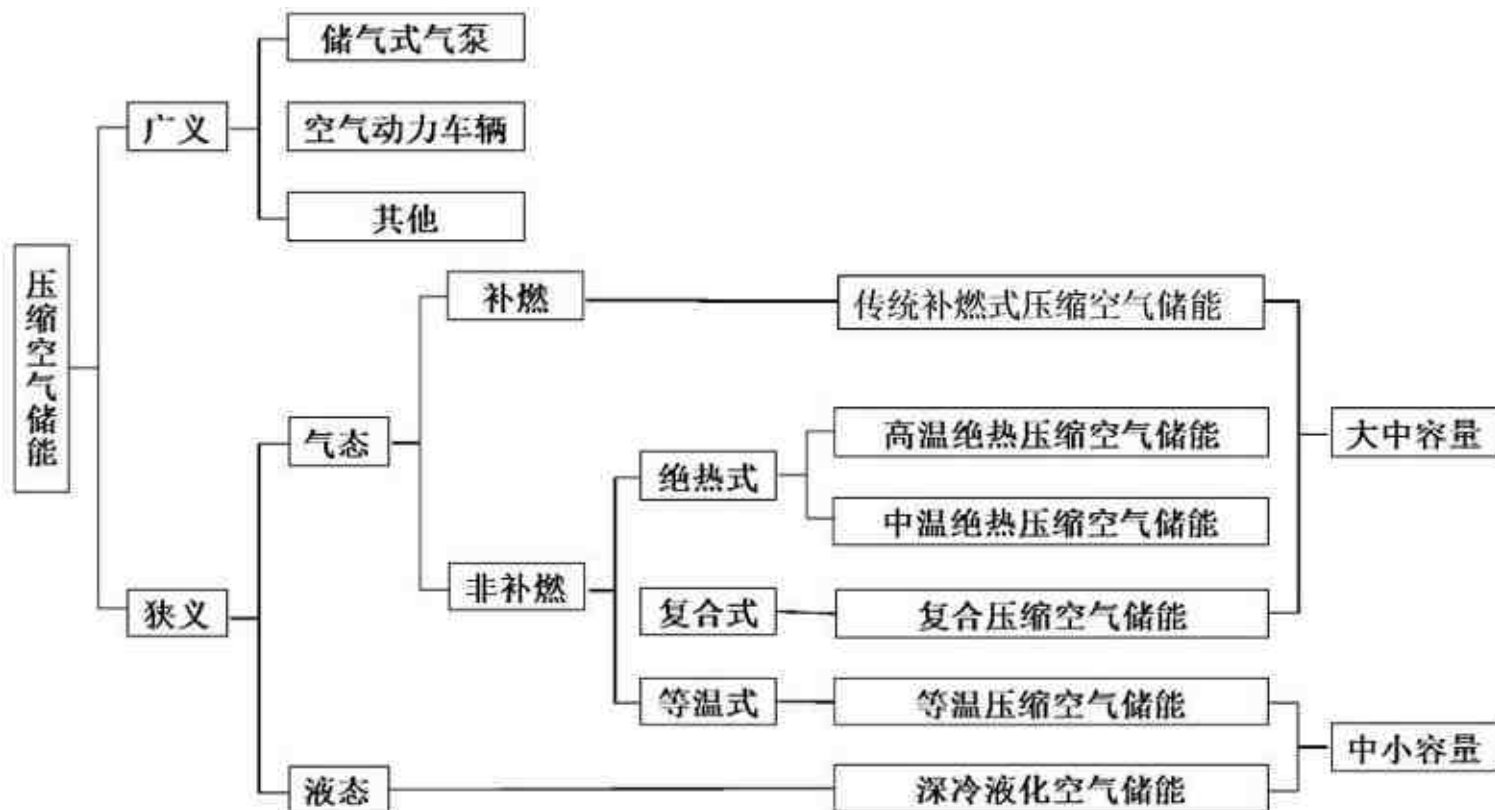


压缩空气储能系统应用场景

3.1 压缩空气储能概述

□ 3.1.3 压缩空气储能分类及技术路线

◆ 3.1.3.1 压缩空气储能分类



压缩空气储能系统一般分类

3.1 压缩空气储能概述

□ 3.1.3 压缩空气储能分类及技术路线

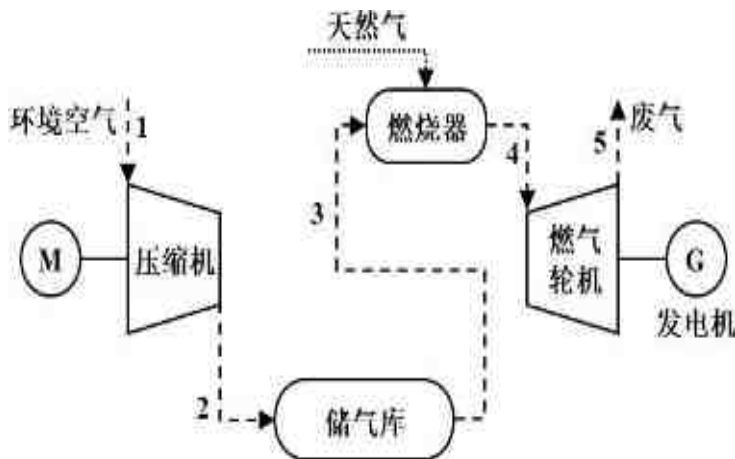
◆ 3.1.3.2 补燃式压缩空气储能

➤ 工作原理

借鉴燃气动力循环，在压缩空气储能系统膨胀机前设置燃烧器，利用**天然气等燃料与压缩空气混合燃烧**，以提升空气透平膨胀机进气温度

➤ 技术特点

结构简单，技术成熟度高、设备运行可靠、投资成本低，具有较长的使用寿命，具备与燃气电站类似的快速响应特性；在当前大力发展绿色能源、控制碳排放量的大背景下，**碳排放**已成为其最大弊端



补燃式压缩空气储能系统

3.1 压缩空气储能概述

□ 3.1.3 压缩空气储能分类及技术路线

◆ 3.1.3.3 绝热式压缩空气储能

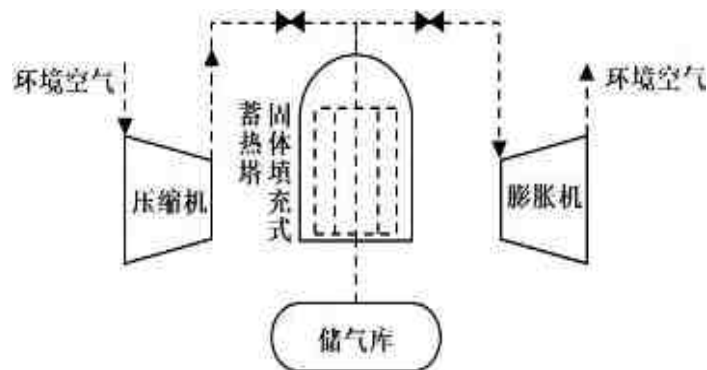
➤ 工作原理

通过提升压缩机单级压缩比获得较高品位的**压缩热能**并存储起来；释能过程中，利用储存的**压缩热**加热透平膨胀机入口空气，实现无需补充燃料的压缩空气储能。根据储热温度不同，可分为高温($>400^{\circ}\text{C}$)和中温($<400^{\circ}\text{C}$)两个技术路线

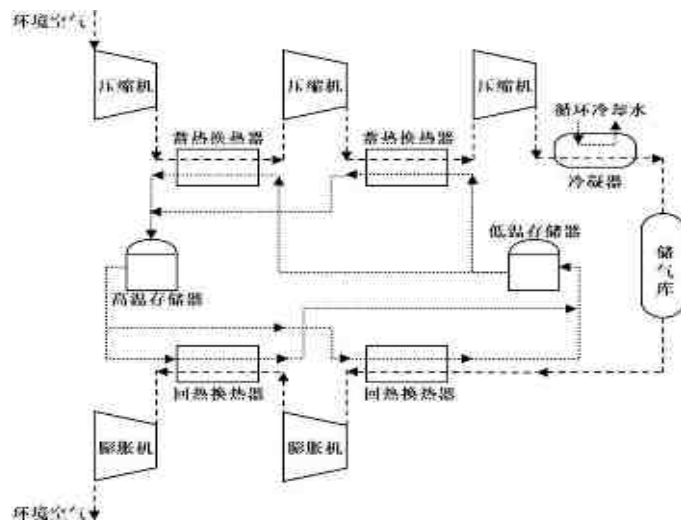
➤ 技术特点

高温绝热压缩空气储能超高温压缩和高温固体蓄热技术存在技术瓶颈，难以实现；

中温绝热压缩空气储能关键设备技术成熟、成本合理，系统稳定性、可控性较强，具备多能联储、多能联供的能力，易于实现工程化应用



高温绝热压缩空气储能系统



中温绝热压缩空气储能系统

3.1 压缩空气储能概述

□ 3.1.3 压缩空气储能分类及技术路线

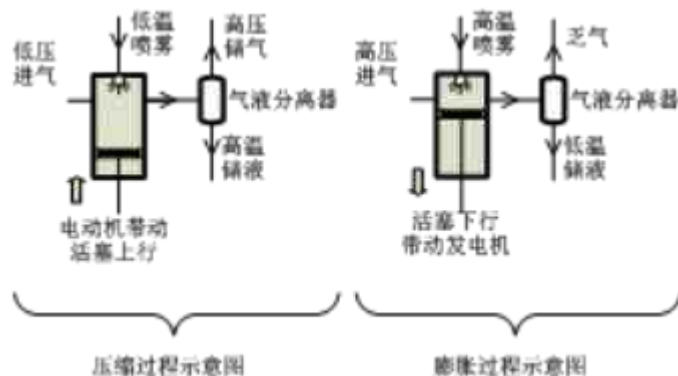
◆ 3.1.3.4 等温式压缩空气储能

➤ 工作原理

采用**准等温过程实现空气压缩和膨胀**。压缩

过程中实时分离压缩热能和压力势能，
使压缩空气不发生较大的温升；在膨胀过程中，实时将存储的压缩热能回馈给压缩空气，使压缩空气不发生较大的温降

等温压缩空气储能优点是系统结构简单、运行参数低，但其装机功率一般较小，储能效率较低，等温的压缩过程和膨胀过程也难以实现，仅适用于小容量的储能场景



等温压缩空气储能系统

3.1 压缩空气储能概述

□ 3.1.3 压缩空气储能分类及技术路线

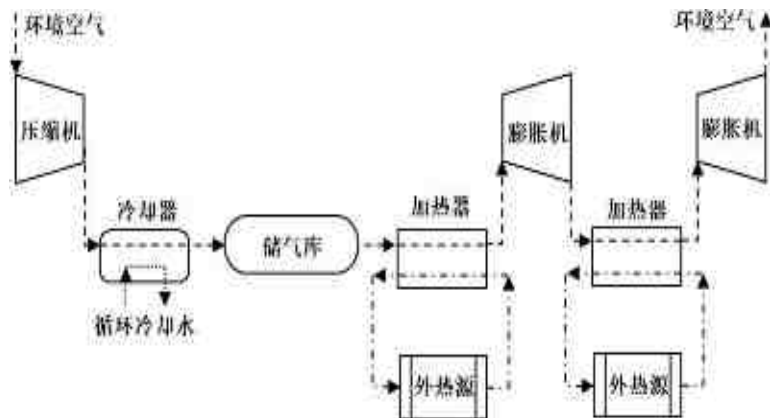
◆ 3.1.3.5 复合式非补燃压缩空气储能

➤ 工作原理

太阳能光热、地热和工业余热均可满足压缩空气储能系统膨胀过程中的加热需求，这种通过**多种能源系统复合实现非补燃压缩储能**的系统称为复合式压缩空气储能系统，其工作原理与绝热式压缩空气储能类似

➤ 技术特点

复合压缩空气储能系统具有较强的多能联储、多能联供的能力，可以实现多种能量形式的储存、转换和利用，满足不同形式的用能需求，提升系统能量综合利用效率



复合式压缩空气储能系统



光热复合式压缩空气储能系统

3.1 压缩空气储能概述

□ 3.1.3 压缩空气储能分类及技术路线

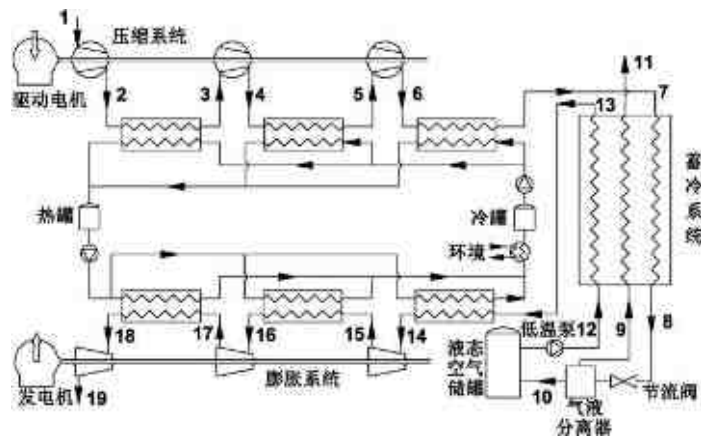
◆ 3.1.3.6 深冷液化空气储能

➤ 工作原理

深冷液化空气储能在压缩、膨胀和储热方面与绝热式压缩空气储能类似，所不同的是，**液态空气储能增加了蓄冷系统**，其包括**过程中空气的冷却、液化、分离、储存**和释能过程中**空气的气化**

➤ 技术特点

最大的优点是空气以常压液态形式储存，储能密度高，可大大减少储气系统的容积，减少电站对地形条件的依赖。但由于增加蓄冷系统，导致系统结构更为复杂



深冷液态空气储能系统



深冷液态空气储能试验系统

3.2 压缩空气储能热力学基础

□ 3.2.1 热力学第一定律

➤ 热力学第一定律(能量守恒定律)

热量可以从一个物体传递到另一个物体，也可以与其他形式的能量互相转换，在上述传递或转换过程中，能量的总量保持不变。对于闭口系统，热力学第一定律数学表达式为

$$dE = \delta Q - \delta W$$

式中， dE 为系统总能的变化， δQ 为系统由外界吸收热量与向外释放热量之差， δW 为系统向外界做功与外界向系统做功之差；

对于一个热力系统，其内部能量 E 由系统内部物质的内能 U 、宏观的动能 E_k 和重力势能 E_g 组成，即

$$dE = dU + dE_k + dE_g$$

$$e = u + \frac{c_f^2}{2} + gz$$

3.2 压缩空气储能热力学基础

□ 3.2.1 热力学第一定律

➤ 体积功

边界上某一微元面积 δA 在压强 p 作用下沿法线移动 dx 并引起体积变化 dV ，则压强 p 在该过程中对系统所做的功为体积功，表达式为

$$\delta W = p(\delta A dx) = p dV$$

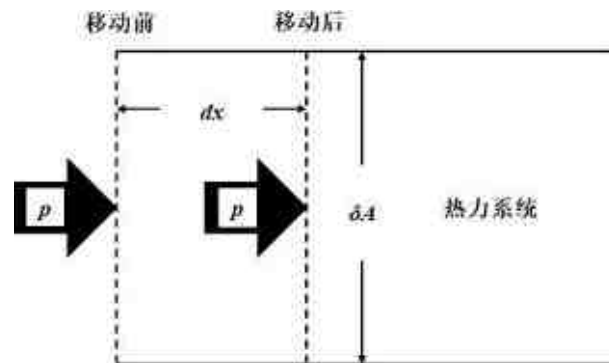
$$\delta w = p dv$$

➤ 流动功

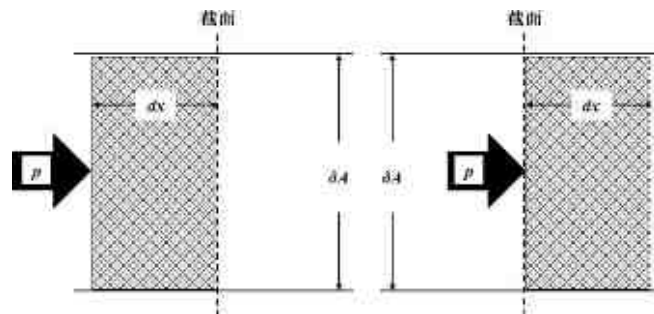
对于存在物质传递的热力过程，热力系统中工质在压力作用下的流动过程也存在功的传递，称为流动功，此时微元的体积未发生变化，其表达式为

$$\delta W = p dV = p \delta m v$$

$$\delta w = p v$$



体积功示意图



流动功示意图

3.2 压缩空气储能热力学基础

□ 3.2.1 热力学第一定律

➤ 焓(Enthalpy)

定义物质内能 U 和推动功 pV 之和为物质的焓 H ，单位质量物质内能 u 与流动功 pv 之和为物质的比焓 h ，单位为(kJ/kg)

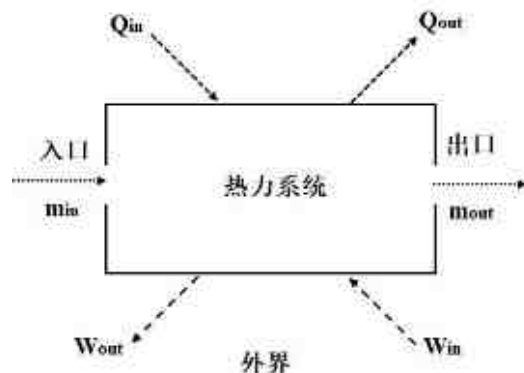
➤ 开口系能量守恒方程

和闭口系不同，开口系能量守恒中还需要考虑工质进出带来的能量变化和流动功，其表达式为

$$\delta Q = dE + \delta W + \left[\delta m_{out} \left(h + \frac{c_f^2}{2} + gz \right)_{out} - \delta m_{in} \left(h + \frac{c_f^2}{2} + gz \right)_{in} \right]$$

式中 c_f 为工质的流速； z 为工质在重力场中的高度； g 为重力加速度；下标 in 和 out 分别表示进口和出口参数。在压缩空气储能研究中，一般忽略空气的动能和势能，则该表达式可简化为

$$\delta Q = dE + \delta W + \delta m_{out} h_{out} - \delta m_{in} h_{in}$$



开口系统能量守恒示意图

3.2 压缩空气储能热力学基础

□ 3.2.1 热力学第一定律

➤ 稳定流动的开口系能量方程

对于达到稳定流动状态的开口系统，即系统内各处物质的状态参数都处于稳定状态，则此时系统内部总能不变，进出系统的物质的量也一致，其表达式为

$$\delta Q = \delta W + \left[\delta m_{out} \left(h + \frac{c_f^2}{2} + gz \right)_{out} - \delta m_{in} \left(h + \frac{c_f^2}{2} + gz \right)_{in} \right]$$

$$\delta q = \Delta h + \delta w + \frac{1}{2} \Delta c_f^2 + g \Delta z$$

➤ 技术功

可通过工程机械技术手段施加或应用的功称作技术功，包括体积功、动能、势能等，因此稳定流动的开口系能量方程可简化为

$$\delta q = \Delta h + \delta w_t$$

3.2 压缩空气储能热力学基础

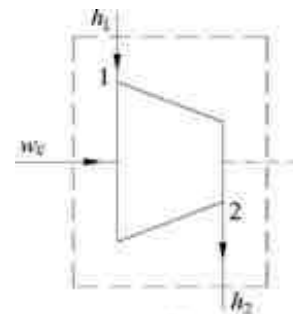
□ 3.2.1 热力学第一定律

➤ 稳定流动的开口系能量方程应用

✓ 压缩机能量方程

$$q = (h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(c_{f2}^2 - c_{f1}^2) + g(z_2 - z_1) - w_c$$

忽略热量及动能、势能差 $w_c = (h_2 - h_1)$



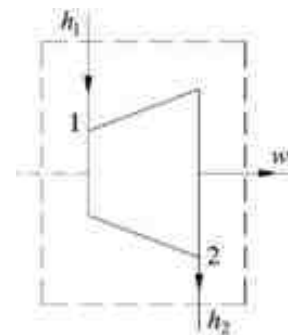
压缩机

✓ 透平机能量方程

$$q = (h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(c_{f2}^2 - c_{f1}^2) + g(z_2 - z_1) + w_t$$

忽略热量及动能、势能差

$$w_t = (h_1 - h_2)$$

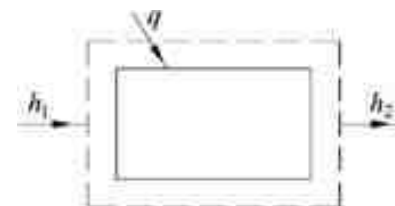


透平机

✓ 换热器能量方程

换热过程无功的交换，动能、势能差

$$q = h_2 - h_1$$



换热器

3.2 压缩空气储能热力学基础

例3-1：已知空气透平进口空气的焓值 h_1 为599.85 kJ/kg，流速 c_{f1} 为30 m/s；透平出口空气焓值 h_2 为352.03 kJ/kg，流速 c_{f2} 为70 m/s；散热损失和势能差可以忽略不计。试求1 kg空气流经空气透平时对外界做的功。若空气流量 m 为20 t/h，试求空气透平的功率。

解：透平的能量方程为

$$q = (h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(c_{f2}^2 - c_{f1}^2) + g(z_2 - z_1) + w_t$$

根据题意可知， $q=0$ ， $g(z_2-z_1)=0$ ，于是1 kg空气所做的功为

$$\begin{aligned} w_t &= (h_1 - h_2) + \frac{1}{2}(c_{f1}^2 - c_{f2}^2) \\ &= (599.85 \text{ kJ/kg} - 352.03 \text{ kJ/kg}) + \frac{1}{2}[(30 \text{ m/s})^2 - (70 \text{ m/s})^2] \times 10^{-3} \\ &= 247.82 \text{ kJ/kg} - 2.0 \text{ kJ/kg} = 245.82 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

空气透平的功率为

$$P = \frac{mw_t}{3600} = \frac{20 \times 10^3 \text{ kg/s} \times 245.82 \text{ kJ/kg}}{3600} = 1365.7 \text{ kW}$$

从上例中可以看出，相对于焓值的变化247.82 kJ/kg，工质动能的变化仅为2.0 kJ/kg，动能的变化对透平机做功能力的影响不大，因此在工程领域中，常常忽略动能的变化。

3.2 压缩空气储能热力学基础

□ 3.2.2 理想气体及其热力学过程

➤ 理想气体状态方程

通过测定温度**T**、压力**p**和比体积**v**(或密度**ρ**)三个基本可测状态参数，可以确定气体所处的热力学状态，其相互关系为：

$$pv = RT$$

此为理想气体状态方程，*R*被称为理想气体常数，单位为[kJ]/(kg·K)]

➤ 比热容

定义单位质量物质在热力过程中温度升高1K所需要吸收的热量为比热容，单位为[kJ]/(kg·K)]。比定容比热容 c_v 和比定压比热容 c_p 分别可表示为

$$c_v = \frac{du}{dT} \qquad c_p = \frac{dh}{dT}$$

定容比热容 c_v 和比定压比热容 c_p 的相互关系为

$$c_p = c_v + R \qquad \gamma = \frac{c_p}{c_v} \qquad c_p = \frac{\gamma}{\gamma - 1} R \qquad c_v = \frac{1}{\gamma - 1} R$$

3.2 压缩空气储能热力学基础

例3-2: 某气体的气体常数 R 为 $0.287 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 其在某状态下的比定压比热容 c_p 为 $1.0065 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 试求其比定容比热容 c_v 及比热容比 γ 。

解: 由比热容之间的相互关系可得

$$c_v = c_p - R = 1.0065 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) - 0.287 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = 0.7195 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

比热容比为

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1.0065 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})}{0.7195 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})} = 1.40$$

3.2 压缩空气储能热力学基础

□ 3.2.2 理想气体及其热力学过程

➤ 熵(Entropy)

根据热力系统发生耗散效应时的热力学温度**T**和耗散的热量**Q**，定义衡量热力过程不可逆程度的热力学状态参数熵，其表达式为：

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad ds = \frac{\delta q}{T}$$

dS越大，说明热力过程中能量的耗散越大，不可逆程度越大。

根据熵的定义、理想气体状态方程、理想气体比热容表达式，可进一步得到理想气体比熵的不同表达式

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}$$

$$ds = c_v \frac{dp}{p} + c_p \frac{dv}{v}$$

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p}$$

3.2 压缩空气储能热力学基础

□ 3.2.2 理想气体及其热力学过程

➤ 理想气体绝热过程

绝热过程是中系统与外界不发生热量传递，因而系统熵增为零，可逆的绝热过程也称等熵过程。等熵过程中的比热容比通常用 k 表示，称为定熵指数或绝热指数。绝热过程中理想气体状态参数的关系式为

$$pv^k = C(\text{常数}) \quad Tv^{k-1} = C(\text{常数}) \quad T/p^{\frac{k-1}{k}} = C(\text{常数})$$

对于复杂的热力学过程，仍然可以采用类似的形式来描述

$$pv^n = C(\text{常数}) \quad Tv^{n-1} = C(\text{常数}) \quad T/p^{\frac{n-1}{n}} = C(\text{常数})$$

n —多变指数

- ✓ 若 n 为零，即 p 为常数，为等压过程；
- ✓ 若 n 为1，即 pv 为常数，为等温过程；
- ✓ 若 n 为 k ，即为绝热指数，为等熵过程；
- ✓ 若 n 为无穷大，即 v 为常数，为等容过程

3.2 压缩空气储能热力学基础

□ 3.2.2 理想气体及其热力学过程

➤ 理想气体热力学过程计算公式

定值比热容的假设下，理想气体各热力学过程的计算公式如下

	等容过程 $n=\infty$	等压过程 $n=0$	等温过程 $n=1$	绝热过程 $n=k$	多变过程 n
T 、 p 、 v 关系	$\frac{T_1}{p_1} = \frac{T_2}{p_2}$	$\frac{T_1}{v_1} = \frac{T_2}{v_2}$	$p_1 v_1 = p_2 v_2$	$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k$ $T_1 v_1^{k-1} = T_2 v_2^{k-1}$ $T_1 p_1^{\frac{k-1}{k}} = T_2 p_2^{\frac{k-1}{k}}$	$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n$ $T_1 v_1^{n-1} = T_2 v_2^{n-1}$ $T_1 p_1^{\frac{n-1}{n}} = T_2 p_2^{\frac{n-1}{n}}$
体积功 w	0	$p(v_2 - v_1)$ $R(T_2 - T_1)$	$RT \ln \frac{v_2}{v_1}$ $RT \ln \frac{p_1}{p_2}$	$\frac{R}{k-1} (T_1 - T_2)$ $\frac{RT_1}{k-1} [1 - (\frac{p_2}{p_1})^{\frac{k-1}{k}}]$	$\frac{R}{n-1} (T_1 - T_2)$ $\frac{RT_1}{n-1} [1 - (\frac{p_2}{p_1})^{\frac{n-1}{n}}]$
技术功 w_t	$v(p_1 - p_2)$	0	$w_t = w$	$\frac{kR}{k-1} (T_1 - T_2)$ $\frac{kRT_1}{k-1} [1 - (\frac{p_2}{p_1})^{\frac{k-1}{k}}]$ $w_t = kw$	$\frac{nR}{n-1} (T_1 - T_2)$ $\frac{nRT_1}{n-1} [1 - (\frac{p_2}{p_1})^{\frac{n-1}{n}}]$ $w_t = nw$

3.2 压缩空气储能热力学基础

例3-3: 空气稳定流经散热良好的压缩机，入口参数为 $p_1=0.101\text{ MPa}$ ， $t_1=20\text{ }^\circ\text{C}$ ，可逆绝热压缩到出口压力 $p_2=0.82\text{ MPa}$ ，然后进入储罐。假设空气的流量 $m=2.5\text{ kg/s}$ ，比定压比热容 $c_p=1.004\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，绝热指数 $k=1.4$ ，试求空气的出口温度及压缩机的功率。

解：根据绝热过程进出口参数公式可得

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = (20 + 273.15)\text{ K} \times \left(\frac{0.82\text{ MPa}}{0.101\text{ MPa}} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 533.27\text{ K}$$

则压缩机出口温度为

$$t_2 = T_2 - 273.15 = 260.12\text{ }^\circ\text{C}$$

根据绝热过程技术功公式可知1 kg工质压缩所消耗的技术功为

$$\begin{aligned} w_t &= -c_p(T_2 - T_1) = -1.004\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}) \times (533.27\text{ K} - 293.15\text{ K}) \\ &= -241.08\text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

则压缩机的功率为

$$P = m|w_t| = 2.5\text{ kg/s} \times 241.08\text{ kJ/kg} = 602.7\text{ kW}$$

3.2 压缩空气储能热力学基础

例3-4: 空气稳定流经散热良好的压缩机，入口参数为 $p_1=0.101\text{ MPa}$ ， $t_1=25\text{ }^\circ\text{C}$ ，可逆绝热压缩到出口压力 $p_2=1.25\text{ MPa}$ ，然后进入储罐。假设空气的流量 $m=1.3\text{ kg/s}$ ，气体常数 $R=0.287\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，试求压缩机的功率：(1) 压缩过程为等温压缩；(2) 压缩过程为 $n=1.28$ 的多变过程；(3) 压缩过程为绝热等熵压缩， $k=1.4$ 。

解：(1) 等温过程

等温过程中，压缩机进出口温度相等，根据表3-1中等温过程技术功的计算公式可得

$$\begin{aligned}w_t = w &= RT \ln \frac{p_1}{p_2} = 0.287\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}) \times (25 + 273.15)\text{ K} \times \ln\left(\frac{0.101\text{ MPa}}{1.25\text{ MPa}}\right) \\&= -215.273\text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

则压缩机的功率为

$$P = m|w_t| = 1.3\text{ kg/s} \times 215.273\text{ kJ/kg} = 279.85\text{ kW}$$

3.2 压缩空气储能热力学基础

(2) 多变过程

根据表3-1中多变过程进出口参数公式可得压缩机出口温度为

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = (25 + 273.15) \text{ K} \times \left(\frac{1.25 \text{ MPa}}{0.101 \text{ MPa}} \right)^{\frac{1.28-1}{1.28}} = 516.94 \text{ K}$$

则压缩1 kg工质所需要的技术功为

$$w_t = \frac{nR}{n-1} (T_1 - T_2) = \frac{0.287 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})}{1.28-1} \times (298.15 - 516.94) \text{ K} \times 1.28 = -287.05 \text{ kJ/kg}$$

则压缩机的功率为

$$P = m|w_t| = 1.3 \text{ kg/s} \times 287.05 \text{ kJ/kg} = 373.17 \text{ kW}$$

(3) 绝热过程

根据表3-1中绝热过程进出参数公式可得压缩机出口温度为

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = (25 + 273.15) \text{ K} \times \left(\frac{1.25 \text{ MPa}}{0.101 \text{ MPa}} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 611.79 \text{ K}$$

则压缩1 kg工质所需要的技术功为

$$w_t = \frac{kR}{k-1} (T_1 - T_2) = \frac{0.287 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})}{1.4-1} \times (298.15 - 611.79) \text{ K} \times 1.4 = -315.04 \text{ kJ/kg}$$

则压缩机的功率为

$$P = m|w_t| = 1.3 \text{ kg/s} \times 315.04 \text{ kJ/kg} = 409.55 \text{ kW}$$

3.3 先进绝热压缩空气储能

□ 3.2.3 热力学第二定律

➤ 热力学第二定律

热力学第二定律在能量守恒的基础上进一步指出：热量会自发地由高温向低温传递，但不会自发地由低温向高温传递，这样逆温差的热量传递过程需要消耗能量

实际热力过程往往伴随着因摩擦、电磁等因素导致的能量耗散，这种耗散一般以热量形式发生。根据热力学第二定律，存在耗散效应的热力过程是不可自发逆转的。

熵的定义为判断热力过程不可逆程度提供了依据，熵越大，说明热力过程中能量的耗散越大，不可逆程度越大

3.2 压缩空气储能热力学基础

□ 3.2.3 理想气体及其热力学过程

➤ 焓(Exergy)

温度为 T_0 的环境条件下，热源所提供的热量中可转化为有用功的最大值称为焓，用 $E_{x,Q}$ 来表示，其表达式为

$$E_{x,Q} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q = Q - T_0 \Delta S$$

式中， T 为热源的温度， T_0 为参考状态下的参考温度，一般选取为当地的环境温度。焓的大小能够作为衡量热源品位高低的参数

对于稳定流动的工质，其焓一般是指其能量焓中的焓，称为焓焓，表示为

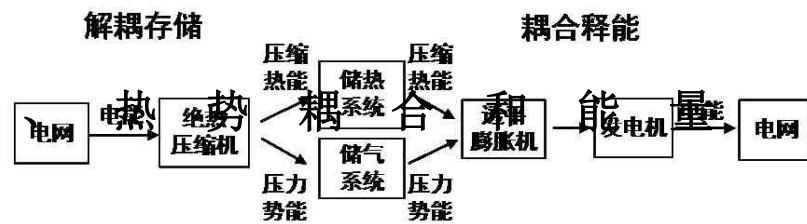
$$E_{x,H} = H - H_0 - T_0(S - S_0)$$

对于确定的环境状态，稳定流动工质焓只取决于给定状态，是个状态参数

3.3 先进绝热压缩空气储能

□ 3.3.1 系统基本原理

先进绝热压缩空气储能运行过程可划分为能量输入、热势解耦、热势耦合、能量输出四个基本过程



- ✓ **能量输入**：电能驱动压缩机进行准绝热压缩，将环境中的空气吸入后压缩至高温高压，电能转化为压缩空气的内能，从而完成能量的输入
- ✓ **热势解耦**：在储能侧换热器内，高温高压空气和换热介质进行换热，空气温度降低进入储气装置，换热介质升温后进入储热系统中进行存储，从而实现压缩热能和压力势能的解耦存储
- ✓ **热势耦合**：在释能侧换热器内，高温储热介质加热储气系统中释放的高压空气进入空气透平膨胀机，热介质温度降低后返回储热系统，实现压缩热能和压力势能的耦合过程
- ✓ **能量输出**：热势耦合过程生成的高温高压空气进入空气透平膨胀机中膨胀做功，完成内能向机械能的转化，而机械能最终在发电机中转化为电能，实现电能的再生和输出

3.3 先进绝热压缩空气储能

□ 3.3.1 系统基本原理

◆ 3.3.1.1 能量输出

压缩过程中产生的热量大部分来不及传递给周围环境，因此空气压缩过程往往可简化为绝热过程进行分析计算。为获得较高的压力，一般需要采用多级压缩机串联的形式。当各级压缩比相等时，理论上整个多级压缩过程消耗的技术功最小。

设压缩机总级数为 N ，则第 i 级压缩机出口温度 $T_{c,i}^{out}$ 和出口压力 $p_{c,i}^{out}$ 分别为

$$T_{c,i}^{out} = T_{c,i}^{in} \left(1 + \frac{\beta_{c,i}^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_{cs,i}} \right) \quad p_{c,i}^{out} = p_{c,i}^{in} \beta_{c,i}$$

每一级压缩机压缩过程的耗功量 $w_{c,i}$ 和总功耗可以表示为

$$w_{c,i} = m_{c,i} \frac{1}{\eta_{cs,i}} \frac{k}{k-1} R_g T_{c,i}^{in} \left(\beta_{c,i}^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \quad w_c = \sum_{i=1}^N w_{c,i}$$

式中， $T_{c,i}^{in}$ 为该级压缩机的进口温度(K)， $p_{c,i}^{in}$ 为该级压缩机的入口压力(MPa)， $\beta_{c,i}$ 为该级压缩机的压缩比， $\eta_{cs,i}$ 为该级压缩机的等熵效率(%)， k 为空气的比热容比， R_g 为空气的气体常数(kJ/kg·K)， $m_{c,i}$ 为该级压缩机的质量流量(kg/s)

3.3 先进绝热压缩空气储能

例3-5：某压缩空气储能系统压缩部分采用四级压缩、级间换热器冷却的方式。空气的初始状态为 $p_0=0.1\text{ MPa}$ 、 $t_1=25\text{ }^\circ\text{C}$ ，经四级压缩后空气压力达到 8.1 MPa 。各级压缩均为等熵压缩且等熵效率均为 85% ，压缩机的质量流量为 2.5 kg/s ，空气的绝热系数为 1.4 ，气体常数为 $0.287\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。假设二、三、四级压缩机的入口温度均为 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 且不考虑换热器的流动阻力损失，则压缩系统的最小功率是多少？此时各级的排气温度分别是多少？

解：压缩机功耗最小时各级压缩比相等，即

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{p_4}{p_0}} = \sqrt[4]{\frac{8.1\text{ MPa}}{0.1\text{ MPa}}} = 3$$

则第一级压缩机的功耗为

$$w_1 = m \frac{1}{\eta} \frac{k}{k-1} R_g T_0 \left(\beta^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) = \frac{2.5\text{ kg/s}}{85\%} \times \frac{1.4}{1.4-1} \times 0.287\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}) \times (273.15 + 25)\text{ K} \times \left(3^{\frac{1.4-1}{1.4}} - 1 \right) = 324.81\text{ kW}$$

第一级压缩机的出口温度为

$$t_1 = T_0 \left(1 + \frac{\beta^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta} \right) - 273.15 = 298.15\text{ K} \times \left(1 + \frac{3^{\frac{1.4-1}{1.4}} - 1}{85\%} \right) - 273.15\text{ K} = 154.34\text{ }^\circ\text{C}$$

由于二、三、四级入口温度相等，则可以求得其功耗分别为

$$w_2 = w_3 = w_4 = 341.15\text{ kW}$$

第二、三、四级的排气温度为

$$t_2 = t_3 = t_4 = 175.85\text{ }^\circ\text{C}$$

则该压缩空气储能系统压缩机的总功耗为

$$w = \sum_{i=1}^4 w_i = 324.81\text{ kW} + 341.15\text{ kW} \times 3 = 1348.26\text{ kW}$$

3.3 先进绝热压缩空气储能

□ 3.3.1 系统基本原理

◆ 3.3.1.2 能量输出

压缩空气储能系统的膨胀过程往往需要通过多级膨胀实现，并在各级膨胀机入口加热压缩空气进气。当各级膨胀比相等时，整个多级膨胀过程输出的技术功最大。

设空气透平总级数为 N ，则第 j 级空气透平出口温度 $T_{t,j}^{out}$ 和压力 $p_{t,j}^{out}$ 分别为

$$T_{t,j}^{out} = T_{t,j}^{in} \left[1 - \left(1 - \beta_{t,j}^{\frac{1-k}{k}} \right) \eta_{ts,j} \right] \quad p_{t,j}^{out} = p_{t,j}^{in} / \beta_{t,j}$$

每一级空气透平膨胀过程的做功量 $w_{t,j}$ 和总输出功可表示为

$$w_{t,j} = m_{t,j} \frac{k}{k-1} R_g T_{t,j}^{in} \left(1 - \beta_{t,j}^{\frac{1-k}{k}} \right) \eta_{ts,j} \quad w_t = \sum_{j=1}^N w_{t,j}$$

式中， $T_{t,j}^{in}$ 为该级空气透平的进口温度(K)， $p_{t,j}^{in}$ 为该级空气透平的入口压力(MPa)， $\beta_{t,j}$ 为该级空气透平的膨胀比， $\eta_{ts,j}$ 为该级空气透平的等熵效率(%)， $m_{t,j}$ 为该级空气透平的质量流量(kg/s)。

3.3 先进绝热压缩空气储能

例3-6：某压缩空气储能系统膨胀部分采用两级膨胀、级间再热的方式。一级空气透平进气压力 $p_1=6.4\text{ MPa}$ 、 $t_1=290\text{ }^\circ\text{C}$ ，两级膨胀完毕后的压力为环境压力 0.1 MPa 。各级膨胀均为等熵膨胀且等熵效率均为90%，透平的质量流量为 5.5 kg/s ，空气的绝热系数为1.4，气体常数为 $0.287\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。假设两级空气透平的入口温度相同且不考虑换热器的流动阻力损失，则透平的最大输出功率是多少？此时各级的排气温度分别是多少？

解：空气透平输出功率最大时，各级透平膨胀比相等，即

$$\beta = \sqrt{\frac{p_1}{p_a}} = \sqrt{\frac{6.4\text{ MPa}}{0.1\text{ MPa}}} = 8$$

由于两级透平的进口温度、等熵效率、膨胀比均相等，所以两级透平的排气温度和输出功率也相等。透平的排气温度为

$$T_2 = T_1 \left[1 - \left(1 - \beta^{\frac{1-k}{k}} \right) \eta \right] = (290 + 273.15)\text{ K} \times \left[1 - 90\% \times \left(1 - 8^{\frac{1-1.4}{1.4}} \right) \right] = 336.11\text{ K}$$

$$t_2 = t_a = T_2 - 273.15 = 62.96\text{ }^\circ\text{C}$$

各级透平的输出功率为

$$\begin{aligned} w_1 = w_2 &= m T_1 \frac{k}{k-1} R \left(1 - \beta^{\frac{1-k}{k}} \right) \eta \\ &= 5.5\text{ kg/s} \times (290 + 273.15)\text{ K} \times \frac{1.4}{1.4-1} \times 0.287\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}) \times 90\% \times \left(1 - 8^{\frac{1-1.4}{1.4}} \right) = 1393.71\text{ kW} \end{aligned}$$

则透平的总输出功率为

$$w = \sum_{j=1}^2 w_j = 2 \times 1393.71\text{ kW} = 2787.42\text{ kW}$$

3.3 先进绝热压缩空气储能

□ 3.3.1 系统基本原理

◆ 3.3.1.3 热能交换

根据能量守恒原理，换热过程中冷、热流体的传热控制方程如下所示

$$\begin{aligned}m_{hot}c_{p,hot}|T_{hot}^{in} - T_{hot}^{out}| &= \varepsilon(mc_p)_{min}|T_{hot}^{in} - T_{cool}^{in}| \\m_{cool}c_{p,cool}|T_{cool}^{in} - T_{cool}^{out}| &= \varepsilon(mc_p)_{min}|T_{hot}^{in} - T_{cool}^{in}|\end{aligned}$$

式中， m 为流体的质量流量(kg/s)， c_p 为比定压比热容(J/kg·K)， ε 为换热装置能效，一般取0.7-0.9， $(mc_p)_{min}$ 表示冷热流体中质量流量和比定压比热容乘积中较小者，下标中的hot和cool分别代表热流体和冷流体。

以压缩侧的换热过程为例，已知空气的入口温度和换热介质的入口温度，则换热装置中空气的出口温度和换热介质的出口温度可采用下列公式计算得出

$$T_a^{out} = T_a^{in} + \varepsilon \frac{(mc_p)_{min}}{m_a c_{p,a}} (T_{HTF}^{in} - T_a^{in}) \quad T_{HTF}^{out} = T_{HTF}^{in} - \varepsilon \frac{(mc_p)_{min}}{m_{HTF} c_{HTF,a}} (T_{HTF}^{in} - T_a^{in})$$

换热器中的压损可以采用以下经验公式计算

$$\Delta p = \left(\frac{0.0083\varepsilon}{1 - \varepsilon} \right) p_{in}$$

3.3 先进绝热压缩空气储能

例3-7：某压缩空气储能压缩侧换热器中采用水进行换热和蓄热。空气侧进口压力为0.8 MPa，进口温度为90 °C，流量为75 kg/s，比定压比热容为定值1.02 kJ/(kg · K)。水侧的进口温度为35 °C，流量为10.5 kg/s，比定压比热容为定值4.18 kJ/(kg · K)。换热器的能效系数为0.85，忽略换热过程中空气的压力损失，试求空气侧和水侧介质的出口温度。

解：空气侧和水侧质量流量和比热的乘积分别为

$$m_a c_{p,a} = 75 \text{ kg/s} \times 1.02 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} = 76.5 \text{ kW/K}$$

$$m_w c_{p,w} = 10.5 \text{ kg/s} \times 4.18 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} = 43.89 \text{ kW/K}$$

则根据压缩侧换热器公式，空气侧和水侧的出口温度分别为

$$T_a^{out} = T_a^{in} + \varepsilon \frac{(mc_p)_{min}}{m_a c_{p,a}} (T_w^{in} - T_a^{in}) = 90 \text{ }^\circ\text{C} + 0.85 \times \frac{43.89 \text{ kW/K}}{76.5 \text{ kW/K}} \times (35 - 90) \text{ }^\circ\text{C} = 63.18 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_w^{out} = T_w^{in} - \varepsilon \frac{(mc_p)_{min}}{m_w c_{w,a}} (T_w^{in} - T_a^{in}) = 35 \text{ }^\circ\text{C} - 0.85 \times \frac{43.89 \text{ kW/K}}{43.89 \text{ kW/K}} \times (35 - 90) \text{ }^\circ\text{C} = 81.75 \text{ }^\circ\text{C}$$

3.3 先进绝热压缩空气储能

□ 3.3.1 系统基本原理

◆ 3.3.1.4 势能存储

势能存储装置可划分为等压和等容两类，等压存储过程中空气压力能够始终维持基本不变，其可采用理想气体状态方程进行分析和计算。等容存储过程中装置容积不发生改变，可按照理想气体等熵过程进行分析和计算。

充气过程开始时储气装置内的初始压力为 p_1 ，充气流量为 q_{in} ，则充气时长为 τ 时储气装置内的压力 p_2 为

$$p_2 = p_1 + \frac{kR_g T_{in}}{V} q_{in} t$$

记放气过程开始时储气装置内的初始压力为 p_3 ，初始温度为 T_3 ，放气流量为 q_{out} ，放气时长为 τ 时储气装置内压力为 p_4 ，则

$$p_4 = p_3 \left(1 - \frac{R_g T_3}{p_3 V} q_{out} t \right)^{-k}$$

可以看出，等容等熵充气过程中，由于单位时间内进入储气装置内的能量不变，储气装置内压力的变化与充气时间呈线性关系；等容等熵放气过程中，虽然放气流量不变，但由于储气装置内压力下降导致排气温度下降，储气装置内压力的变化与放气时间呈反对数函数关系

3.3 先进绝热压缩空气储能

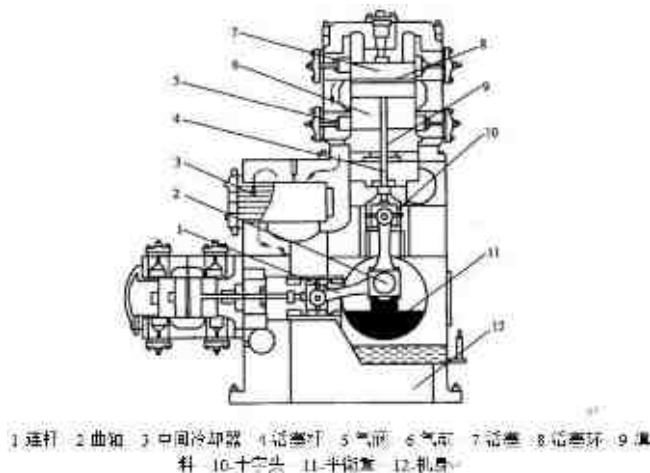
□ 3.3.2 系统关键设备

◆ 3.3.2.1 压缩机

- ✓ 压缩机主要可以分为**容积型与速度型**两大类；
- ✓ 根据运动方式不同，容积型压缩机可分为往复式和回转式两类。往复式压缩机一般指活塞式压缩机。回转式压缩机包括螺杆式、涡旋式、滑片式等；
- ✓ 速度型压缩机则主要指透平式，根据介质在叶轮内的流动方向，透平式压缩机又可进一步分为离心式和轴流式；
- ✓ 可用于压缩空气储能的压缩机主要有**往复式、离心式和轴流式**三大类；

➤ 往复式压缩机

- ✓ 工作中，活塞在曲柄连杆的带动下往复运动，气阀在气缸内外压差的作用下开启或关闭，完成了由吸气、压缩和排气三个过程组成的工作循环。
- ✓ **优点：**机械效率高，排气稳定，排气压力高。
- ✓ **缺点：**转速低、结构复杂、易损件多、日常维修量大；动平衡性差，运转时有振动等。



往复式压缩机示意图

3.3 先进绝热压缩空气储能

□ 3.3.2 系统关键设备

◆ 3.3.2.1 压缩机

➤ 离心式压缩机

✓ 气体由吸气室吸入，在高速旋转的叶轮离心力作用速度、温度都得到提高，再进入扩压器，将气体的速度能转变为压力能，从而实现空气的压缩。经过多级连续压缩后，最终由排气口排出。

✓ **优点：**转速高、排气量大、排气均匀，性能曲线平坦

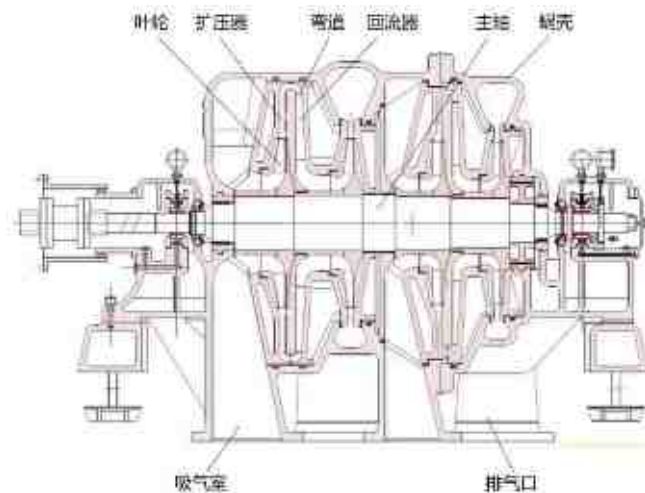
✓ **缺点：**存在喘振现象，危害压缩机和系统运行安全

➤ 轴流式压缩机

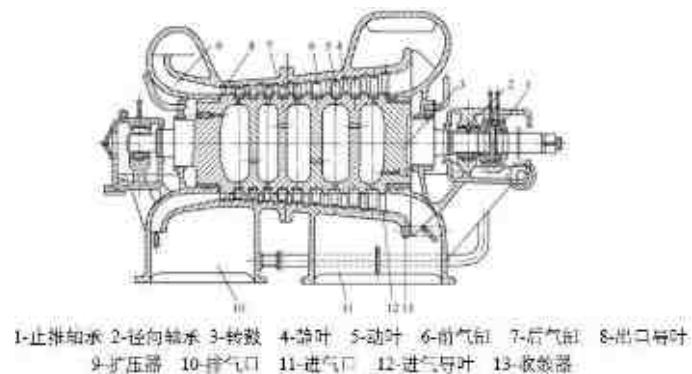
✓ 依靠高速旋转的叶轮将气体从轴向吸入，气体获得速度后排入导叶，经扩压后再沿轴向排出

✓ **优点：**通流能力大、流量大、阻力损失小、效率高

✓ **缺点：**压比较小，流量可调节的范围比较小，用于压缩空气储能系统时，一般需要和离心压缩机串联使用



离心式压缩机示意图



轴流式压缩机示意图

3.3 先进绝热压缩空气储能

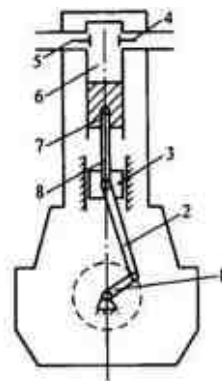
□ 3.3.2 系统关键设备

◆ 3.3.2.2 膨胀机

- ✓ 和压缩机类似，膨胀机也主要分为**容积型与速度型**两大类；
- ✓ 根据运动方式不同，容积型膨胀机可分为往复式和回转式两类。往复式压缩机一般指活塞式膨胀机。回转式膨胀机包括螺杆式、涡旋式等；
- ✓ 速度型膨胀机则主要指透平式，根据介质在叶轮内的流动方向，可以分为径流式和轴流式；
- ✓ 可用于压缩空气储能的膨胀机主要有**往复式、径流式和轴流式**三大类；

➤ 往复式膨胀机

- ✓ 高压气体通过进气阀进入气缸后，气体膨胀时推动活塞运动，并通过曲轴连杆结构将活塞的往复运动转化成曲轴的旋转运动，向外输出机械功
- ✓ **优点：**结构简单，制造技术成熟，容易实现高膨胀比
- ✓ **缺点：**流量小，转速低，做功不连续，工作过程阻力损失大，效率低，不适合大型场合的应用



1-曲轴 2-连杆 3-十字头 4-排气阀
5-进气阀 6-气缸 7-活塞 8-活塞杆
往复式膨胀机示意图

3.3 先进绝热压缩空气储能

□ 3.3.2 系统关键设备

◆ 3.3.2.2 膨胀机

➤ 径流式膨胀机

✓ 气体由膨胀机的蜗壳进入叶轮，叶轮一方面使得高速气体的动能转化为机械能，由主轴向外输出做功，气体温度降低获得冷量，同时改变了气体的流动方向，使它由径向流动转化为轴向流动

✓ **优点：**效率较高、重量轻、叶片少，结构简单可靠

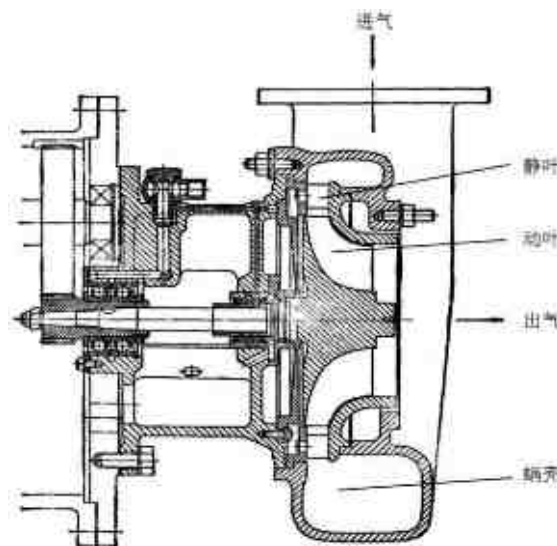
✓ **缺点：**径向外壳的尺寸较大，流量受到约束

➤ 轴流式膨胀机

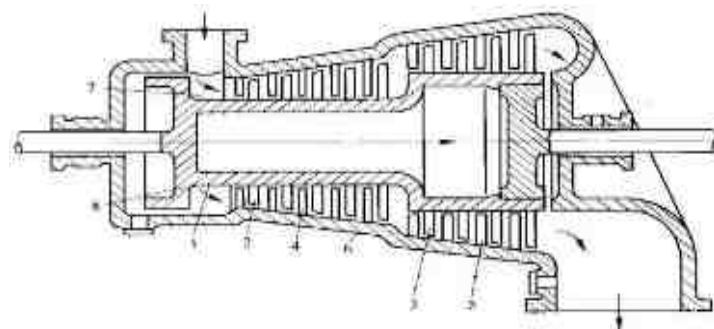
✓ 利用气体膨胀时速度能的变化来传递能量，类似于径流式膨胀机，不同的是气体由轴向流入叶轮

✓ **优点：**通流能力强，适用于要求大流量的场合；易实现多级串联，效率高于径流式膨胀机

✓ **缺点：**制造工艺要求较高，小流量运行时效率会降低



径流式膨胀机示意图



1-叶轮 2、3-动叶 4、5-静叶 6-气缸 7-进气 8-平衡活塞

轴流式膨胀机示意图

3.3 先进绝热压缩空气储能

□ 3.3.2 系统关键设备

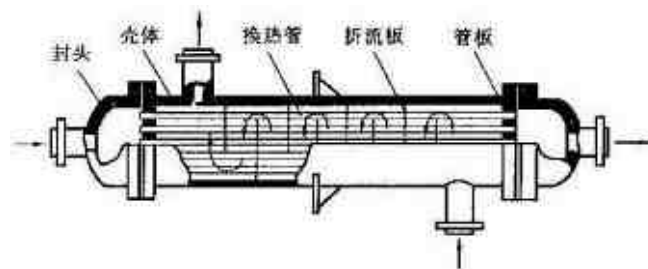
◆ 3.3.2.3 换热器

➤ 管壳式换热器

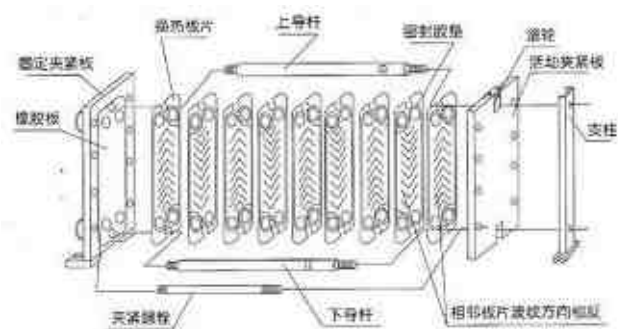
- ✓ 以封闭在壳体中的管束壁面作为传热面的间壁式换热器，进行换热的冷热两种流体，一种在管内流动，称为管程流体；另一种在管外流动，称为壳程流体
- ✓ **优点：**可承受较高的工作温度和工作压力，制造加工工艺简单，运行可靠性高，应用广泛
- ✓ **缺点：**换热系数低、体积大、换热端差大

➤ 板式换热器

- ✓ 由一系列具有一定波纹形状的金属片叠装而成的一种新型高效换热器，通过板片进行热交换
- ✓ **优点：**换热效率高、结构紧凑轻巧、占地面积小、安装清洗方便、应用广泛
- ✓ **缺点：**无法承受高温高压，密封难度高，易出现泄漏



管壳式换热器示意图



板式换热器示意图

3.3 先进绝热压缩空气储能

□ 3.3.2 系统关键设备

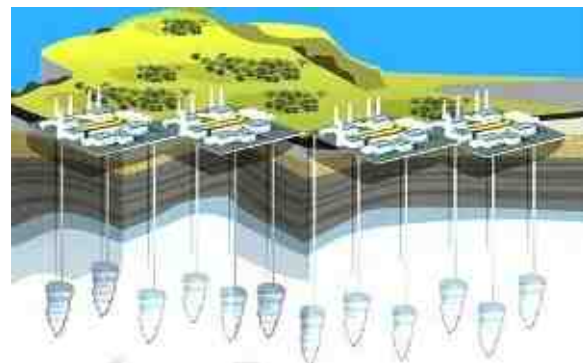
◆ 3.3.2.4 势能存储装置

➤ 等容储气装置

- ✓ 钢制压力容器成本高、重量大、体积大、占地大
- ✓ 管线钢储气成本较为合理，可用于中小型**CAES**系统
- ✓ 盐穴、煤矿巷道等地下洞穴为代表的地下储气库容量大、占地少、力学性能稳定，经简单改造即可支撑建设大规模**CAES**系统
- ✓ 石油、天然气采空区或地下含水层也可用于建设**CAES**

➤ 等压储气装置

- ✓ 承压气囊壁面具有一定的柔性或伸缩性，利用其在水下存储高压压缩空气可实现气囊内部压缩空气压力的基本稳定，从而实现恒压充气和放气
- ✓ 利用重物的重力和储气装置内压缩空气压力之间的平衡关系实现压力的调节和控制，也可实现恒压充气和放气



地下盐穴储气库



水下气囊储气装置

3.4 压缩空气储能热力学分析

□ 3.4.1 能量分析法—基于热力学第一定律

- **循环效率**：释能过程中总输出的能量和储能过程中总消耗的能量之比

$$\eta_{RTE} = \frac{\int_0^{\tau_{dis}} w_t d\tau + \int_0^{\tau_{dis}} q_h d\tau + \int_0^{\tau_{dis}} q_c d\tau}{\int_0^{\tau_{ch}} w_c d\tau + \int_0^{\tau_{ch}} q_{in} d\tau}$$

- **电-电效率**：释能过程中总输出的电能和储能过程中总消耗的电能之比

$$\eta_{ESE} = \frac{\int_0^{\tau_{dis}} w_t d\tau}{\int_0^{\tau_{ch}} w_c d\tau}$$

- **储能密度**：单位储气容积储存的电能

$$\rho_{ES} = \frac{\int_0^{\tau_{dis}} w_t d\tau}{V_{as}}$$

式中， τ_{ch} 和 τ_{dis} 分别为储能时间和释能时间(h)， w_t 为系统释能时透平膨胀机的输出功率(kW)， w_c 为系统储能时压缩机消耗的功率(kW)， q_{in} 为系统储能时除了电能外的其他输入热量的功率(kW)， q_h 和 q_c 分别为系统释能时供热和供冷的功率(kW)， V_{as} 为压缩空气储能电站储气系统的容积(m³)

3.4 压缩空气储能热力学分析

例3-8：某光热复合式压缩空气储能的技术参数如下表所示，试求其电-电效率、循环效率和储能密度。

参数	单位	数值
储能阶段功耗	kW	320
储能运行时长	h	4
光热集热功率	kW	70
光热集热时长	h	6
释能阶段发电量	kW	210
释能阶段时长	h	4
储气容积	m ³	200

解：系统的循环效率为

$$\eta_{RTE} = \frac{w_t \tau_{dis}}{w_c \tau_{ch} + q_{solar} \tau_{solar}} = \frac{210 \text{ kW} \times 4 \text{ h}}{320 \text{ kW} \times 4 \text{ h} + 70 \text{ kW} \times 6 \text{ h}} = 49.4\%$$

电-电效率为

$$\eta_{ESE} = \frac{w_t \tau_{dis}}{w_c \tau_{ch}} = \frac{210 \text{ kW} \times 4 \text{ h}}{320 \text{ kW} \times 4 \text{ h}} = 65.6\%$$

储能密度为

$$\rho_{ES} = \frac{w_t \tau_{dis}}{V_{as}} = \frac{210 \text{ kW} \times 4 \text{ h}}{200 \text{ m}^3} = 4.2 \text{ kWh/m}^3$$

3.4 压缩空气储能热力学分析

□ 3.4.2 焓平衡分析法—基于热力学第二定律

- **焓效率**：释能过程中输出能量的焓和储能过程中输入能量的焓之比

$$\eta_{EXE} = \frac{\int_0^{\tau_{dis}} w_t d\tau + \int_0^{\tau_{dis}} E_{x,h} d\tau + \int_0^{\tau_{dis}} E_{x,c} d\tau}{\int_0^{\tau_{ch}} w_c d\tau + \int_0^{\tau_{ch}} E_{x,in} d\tau}$$

式中， $E_{x,h}$ 和 $E_{x,c}$ 分别为系统释能过程中时供热和供冷的焓(kW)，单位为； $E_{x,in}$ 为系统储能时除了电能外的其他输入热量的焓(kW)；其他符号与循环效率和电-电效率意义相同。

- **焓损失**：系统输入焓和输出焓之间的差值，压缩机、透平和换热器的焓损失分别为

$$\Delta E_{x,c} = w_c - m_c(e_{x,out} - e_{x,in})$$

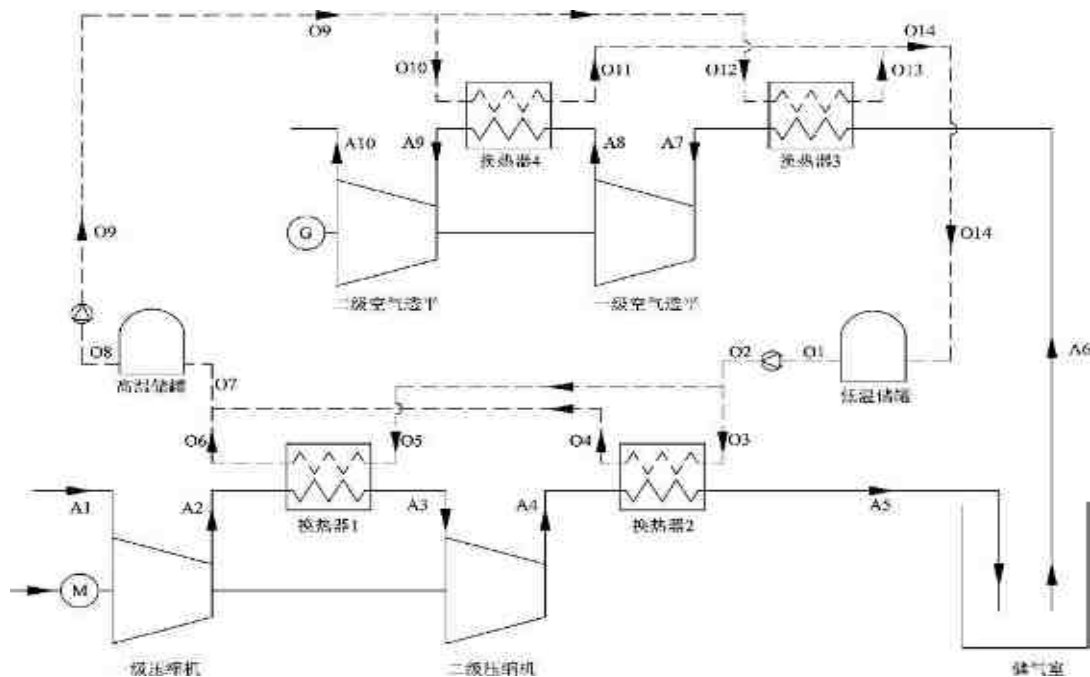
$$\Delta E_{x,t} = m_t(e_{x,in} - e_{x,out}) - w_t$$

$$\Delta E_{x,he} = m_{hot}(e_{x,hot,in} - e_{x,hot,out}) - m_{cool}(e_{x,cool,out} - e_{x,cool,in})$$

式中，下标 c 、 t 和 he 分别表示压缩机、透平和换热器， hot 和 $cool$ 分别表示热流体和冷流体； $e_{x,in}$ 和 $e_{x,out}$ 分别为进口空气和出口比焓值(kJ/kg)， m 为质量流量(kg/s)， w_c 和 w_t 分别为压缩机和透平的功耗和做功量(kW)。

3.4 压缩空气储能热力学分析

例3-9：某先进绝热压缩空气储能系统采用两级压缩、两级膨胀的技术方案，采用高温合成导热油作为传热和储热工质，其方案如下图所示。图中，各物流节点都进行了标注，A代表空气，O代表导热油，各节点的压力、温度、流量、比焓如下表所示。该方案中，压缩时间为8小时，膨胀时间为4小时。一级、二级压缩机的功率分别为10.09 MW和9.60 MW，一级、二级透平的功率分别为12.76 MW和12.67 MW。试求各压缩机、透平和换热器的焓损失。



例3-9附图

3.4 压缩空气储能热力学分析

例3-9附表

节点	P/MPa	t/°C	m/(kg/s)	ex/(kJ/kg)
A1	0.101	20	27.78	0.0632
A2	1.112	374.4	27.78	327.5
A3	1.112	40	27.78	204.9
A4	10.0	374.8	27.78	517.5
A5	10.0	40	27.78	389.4
A6	6.0	25	55.56	346.6
A7	6.0	305	55.56	434.5
A8	0.775	79.97	55.56	178.4
A9	0.775	305	55.56	259
A10	0.101	82.26	55.56	4.897
O1	0.101	30	34.75	0.059
O2	0.30	30.06	34.75	0.2653
O3	0.30	30.06	18.18	0.2653
O4	0.20	310.4	18.18	180.9
O5	0.30	30.06	16.57	0.2653
O6	0.20	319.5	16.57	192.2
O7	0.20	314.8	34.75	186.2
O8	0.30	310	57.09	180.4
O9	0.30	310	57.09	180.5
O10	0.30	310	27.28	180.5
O11	0.20	85	27.28	8.527
O12	0.30	310	29.81	180.5
O13	0.20	30	29.81	0.1611

3.4 压缩空气储能热力学分析

例3-9 解：一级压缩机的焓损失为

$$\Delta E_{x,c1} = w_{c1} - m_{c1}(e_{x,A2} - e_{x,A1}) = 10.09 \text{ MW} - 27.78 \text{ kg/s} \times \frac{(327.5 - 0.0632) \text{ kJ/kg}}{1000} = 0.994 \text{ MW}$$

相似地，可以计算出二级压缩机的焓损失为

$$\Delta E_{x,c2} = w_{c2} - m_{c2}(e_{x,A4} - e_{x,A3}) = 9.60 \text{ MW} - 27.78 \text{ kg/s} \times \frac{(517.5 - 204.9) \text{ kJ/kg}}{1000} = 0.916 \text{ MW}$$

一级透平的焓损失为

$$\Delta E_{x,t1} = m_{t1}(e_{x,A7} - e_{x,A8}) - w_{t1} = 55.56 \text{ kg/s} \times \frac{(434.5 - 178.4) \text{ kJ/kg}}{1000} - 12.76 \text{ MW} = 1.47 \text{ MW}$$

相似地，可以计算出二级透平的焓损失为

$$\Delta E_{x,t2} = m_{t2}(e_{x,A9} - e_{x,A10}) - w_{t2} = 55.56 \text{ kg/s} \times \frac{(259 - 4.897) \text{ kJ/kg}}{1000} - 12.67 \text{ MW} = 1.45 \text{ MW}$$

一级换热器的焓损失为

$$\begin{aligned} \Delta E_{x,he1} &= m_{A2}(e_{x,A2} - e_{x,A3}) - m_{O5}(e_{x,O6} - e_{x,O5}) \\ &= \frac{27.78 \text{ kg/s} \times (327.5 - 204.9) \text{ kJ/kg} - 16.57 \text{ kg/s} \times (192.2 - 0.2653) \text{ kJ/kg}}{1000} = 0.237 \text{ MW} \end{aligned}$$

相似地，可以计算出二级、三级、四级换热器的焓损失分别为0.275MW、0.492MW和0.213MW

3.5 压缩空气储能应用案例

□ 3.5.1 补燃式压缩空气储能电站

◆ Huntorf电站

- 位于德国北部的下萨克森州境内，**1978**年建成投运，世界首座商业运行的压缩空气储能电站
- 装机容量为**290 MW** 可实现连续发电**2**小时
- 为电网提供快速备用容量服务，其另需要来约**6**分钟即可达到额定出力



Huntorf电站全景

◆ McIntosh电站

- 位于美国阿拉巴马州境内，**1991**年建成投运，世界第二座商业运行的压缩空气储能电站
- 装机容量为**110 MW** 可实现连续发电**26**小时
- 采用一座地下盐穴储气，总容积**62**万立方米
- 在高压透平入口增加一个预热器，实现了低压透平高温排气的余热利用，提高了系统的效率



McIntosh电站全景

3.5 压缩空气储能应用案例

□ 3.5.2 先进绝热压缩空气储能电站

◆ TICC-500电站

- 位于安徽芜湖，**2014**年建成投运，世界首座实现并网运行先进绝热压缩空气储能工业试验电站
- 装机容量为**500 kW** 可实现连续发电**1**小时
- 采用两个钢制压力容器储气，总容积**100**立方米
- ◆ 技术路线：五级压缩、二级膨胀、加压水蓄热



TICC-500电站全景

- 位于江苏金坛，**2021**年建成投运，我国唯一的压缩空气储能国家示范项目，世界首座商业运行先进绝热压缩空气储能工业电站
- 装机容量为**6MW**，可实现连续发电**5**小时
- 采用**1**座盐穴储气，容积**22.4**万立方米
- 技术路线：两级离心压缩、两级轴流膨胀、高温成导热油蓄热



江苏金坛盐穴压缩空气储能国家示范项目全景

3.5 压缩空气储能应用案例

□ 3.5.3 其他电站

◆ 西宁光热复合压缩空气储能电站

- 位于青海西宁，**2017**年建成投运，世界首座实现 并网运行光热复合式压缩空气储能工业试验电站
- 装机容量为**100 kW** 可实现连续发电**1**小时
- 采用管线钢储气，总容积**15**立方米
- 技术路线：槽式光热集热复合压缩空气储能



◆ 液态空气储能电站

- 位于英国伯明翰大学，**2012**年建成投运，世界首座液态空气储能试验平台
- 装机容量为**350 kW** 可实现连续发电**4**小时
- 采用采用八个石子填充床作为冷量回收装置
- 系统效率低、动态过程损失大，导



Highview液态空气储能电站

总结与展望

- 压缩空气储能是采用**压缩空气**作为能量载体，实现**能量存储和跨时间、空间转移和 利用**的一种能源系统；
- 本章首先介绍了压缩空气储能的基本概念、主要用途和主要类别，回顾了与压缩空气储能相关的主要**热力学基础知识**；
- 选取具有代表性的**先进绝热压缩空气储能技术**作为重点，详细介绍其**基本原理和关键设备**；基于热力学第一定律和热力学第二定律，阐述了压缩空气储能系统的**热力学分析方法**；
- 对基于不同技术路线的典型**压缩空气储能电站**进行了详细的介绍，概述了压缩空气储能系统在实际应用场景中的运行特性；
- 压缩空气储能可广泛用于电源侧、电网侧和用户侧，发挥**调峰、调频、容量备用、无功补偿和黑启动**等作用；在我国大力发展新型电力系统和“**双碳**”目标愿景下，压缩空气储能技术未来具有非常广阔的应用前景

第四章 电化学储能

- ☐ 电化学储能概述
- ☐ 铅酸电池
- ☐ 锂离子电池
- ☐ 液流电池
- ☐ 钠硫电池
- ☐ 液流电池常用电化学储能的对比
- ☐ 电化学储能特性分析
- ☐ 总结与展望

4.1 电化学储能的概述

□ 电化学储能的基本概念

电化学储能通过储能电池完成**能量储存、释放与管理**过程。储能电池在充电时将外部直流电源连在蓄电池上进行充电，使电能转化成化学能储存起来，放电时再将储存的化学能转换成电能释放出来去驱动外部设备。



电化学储能应用领域及作用

□ 电化学储能的作用

电化学储能技术在电力系统中应用广泛，应用于**发电、输电、配电、送电**等四个环节，主要作用有**调峰调频、削峰填谷、平滑新能源波动**等。

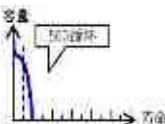
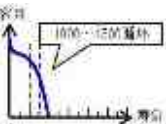
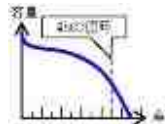
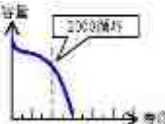
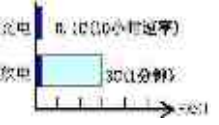
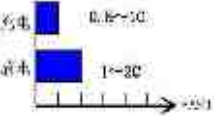
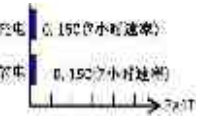
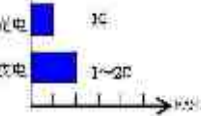


2014-2021年中国电化学储能累计装机容量及增速

4.1 电化学储能的概述

电池储能技术存储能量可以从数秒延伸至数小时，输出功率在额定范围内可调，可以满足电网对功率型储能与能量型储能的应用需求。

部分电池储能技术已经商业化，也有正在从示范走向商业化。

分类特征	铅蓄电池	镍氢电池	NAS电池	锂离子电池
体积·重量 (能量密度)				
循环寿命				
温度特性				
快速充放电				

部分储能电池特征概述图

4.1 电化学储能的概述

□ 电化学储能技术

◆ 能量管理技术

将能量管理技术按储能设备类型可分为电化学储能变流器系统（**power conversion system, PCS**）、电池管理系统（**battery managementsystem, BMS**）和能量管理系统（**energy managment system EMS**）。

1.PCS

- ◆ **PCS**由**DC/AC**双向变流器、控制单元等构成。**PCS**控制器通过通讯接收后台控制指令，根据功率指令的符号及大小控制变流器对电池进行充电或放电，**实现对电网有功功率及无功功率的调节**。
- ◆ **PCS**控制器通过控制器局域网络(**Controller Area Network, CAN**)接口与**BMS**通讯，获取电池组状态信息，可实现对电池的保护性充放电，确保电池运行安全。



储能变流器实物图

4.1 电化学储能的概述

□ 电化学储能技术

◆ 能量管理技术

2.BMS

- ◆ 电池管理系统是一种对储能系统当中的电池进行管理的系统，通过分析电池内部特性，将采集到的电池充放电数据上传至能量管理系统和BMS内部控制系统，进而确定各电池做何动作。
- ◆ 电池管理系统能够将电池单体和许多电池单体通过串并联组成的电池组进行分层管理，实现有效的告警、保护和均衡管理，使得各电池和电池组达到最佳运行状态。



电池管理系统实物图

4.1 电化学储能的概述

□ 电化学储能技术

◆ 能量管理技术

3.EMS

- ◆ 能量管理系统是对整个储能系统进行管理的系统，对各储能电站进行**协调调度**，**下发控制命令**至子站储能**BMS**执行。
- ◆ 储能**BMS**子站响应储能统一调控主站调度命令并根据储能设备运行状态合理地分配到各电池簇中，实现**电池模组和电池簇能量与信息管理的融合**。
- ◆ 能量管理系统主要用于**数据采集、网络监控、能量调度和数据分析**。



储能系统能量管理平台

4.1 电化学储能的概述

□ 电化学储能技术

◆ 电池热管理技术

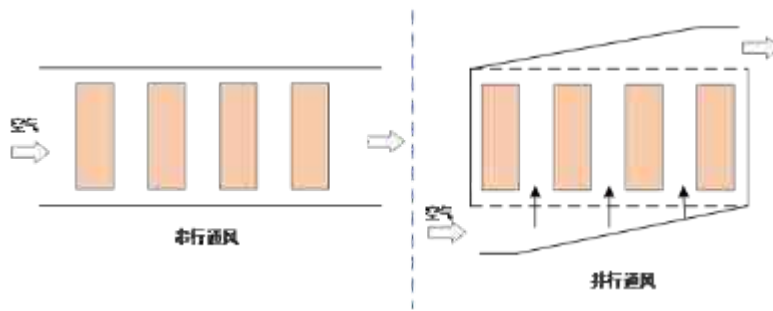
目前研究较多的电池热管理系统有**风冷**、**液冷**这两种方式。

自然风冷通过空气本身与电池表面的温度差产生热对流，使得电池产生热量被转移到空气中，实现电池模组及电池箱的散热；强制风冷需要额外安装风机、风扇等外部电力辅助设备，使得外部空气通过风道进入电池模组内，循环流动对电池进行冷却。

液冷散热方式利用液体流动转移电池工作产生的热量，对电池组或电池箱进行散热。



风冷系统实物图

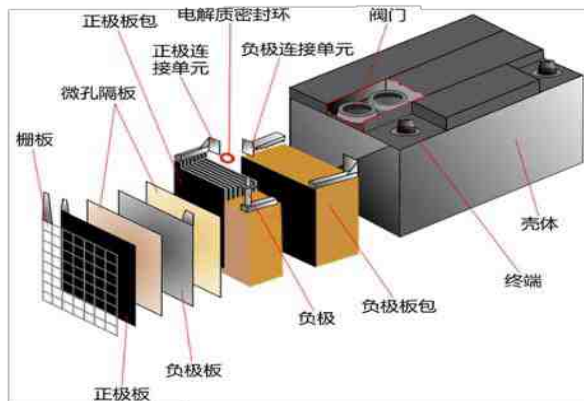


风冷通风方式路线图

4.2 铅酸电池

□ 铅酸电池的原理

传统铅酸电池的电极由铅及其氧化物制成，电解液采用硫酸溶液。放电状态下，正负极的主要成分均为硫酸铅。放电时，正极的二氧化铅与硫酸反应生成硫酸铅和水，负极的铅与硫酸反应生成硫酸铅；充电时，正极的硫酸铅转化为二氧化铅，负极的硫酸铅转化为铅。

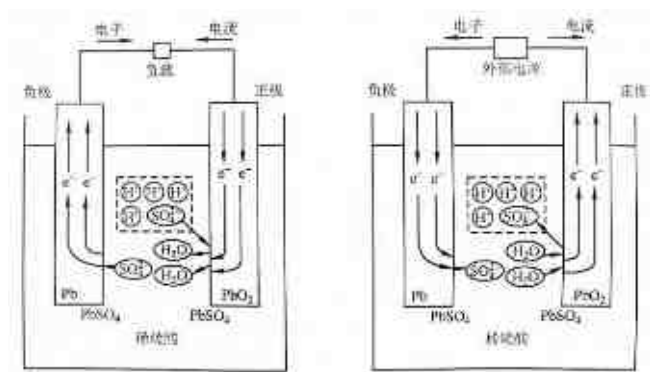


铅酸电池结构示意图

电池正极反应如下：

电池负极反应如下：

电池总反应如下：



铅酸电池充放电电流向图

4. 2铅酸电池

□ 铅酸电池的特点

- ◆ 蓄电池**安全密封**，在正常操作中，电解液不会从电池的端子或外壳中泄露出；
- ◆ 特殊的吸液隔板将酸保持在内，电池内部没有自由酸液，因此电池可放置在任意位置；
- ◆ 电池内压超出正常水平后，密封铅酸蓄电池放出多余气体并重新密封，保证电池内没有多余气体；
- ◆ 由于独一无二的气体复合系统使产生的气体转化成水，故在使用过程中无需加水，**维护较为简单**；
- ◆ 采用了有抗腐蚀结构的铅钙合金栏板，电池可浮充使用**10-15年**，**使用寿命长**；
- ◆ 采用先进的生产工艺和严格的质量控制系统，电池的**质量稳定，性能可靠**。



铅酸电池单体实物图



铅酸电池组实体图

4. 2铅酸电池

电解液

- ◆ 铅酸电池的电解液是稀硫酸溶液，用水和80%浓硫酸按一定比例配制而成，其密度一般为1.24-1.30g/cm³，比重为12.75-12.85g/cm³。
- ◆ 在电池充放电过程中，由于电解和蒸发，电解液中的水会逐渐减少，导致电解液液位下降，所以需要及时补充蒸馏水以防止此现象缩短电池寿命。

指标名称		指 标	
		(%)	(g/L)
硫酸含量		40~15	480~180
密度 $\rho(g/cm^3)$. 50°C		1.3~1.1	
灼烧残渣含量	≤	0.02	0.24
铁含量	≤	0.00004	0.00048
砷含量	≤	0.00003	0.00036
氯含量	≤	0.0007	0.0084
硝酸盐含量	≤	0.0005	0.0060
铜含量	≤	0.002	0.024
还原高锰酸钾物质(以O计)	≤	0.0008	0.010
(以KMnO ₄ 计)	≤	0.0032	0.038
外 观		无色、透明	

4. 2铅酸电池

□ 铅酸电池工作方式

铅酸电池主要工作方式分别为**充电放电制**和**定期浮充制**。

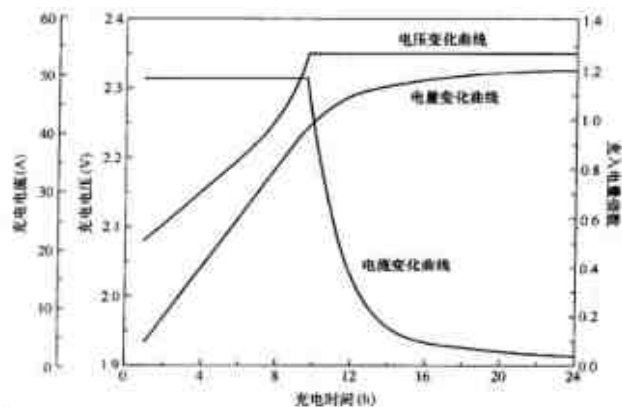
充电放电制是指铅酸电池组充电过程与放电过程分别进行的一种工作方式，即先用整流装置给铅酸电池组充满电后，再由铅酸电池的负载供电（放电），然后**再充电、再放电**的一种循环工作方式。充电放电制主要用于移动型铅酸电池组。

定期浮充制就是整流设备与铅酸电池组并联并定期轮流向负载供电的一种工作方式。直流电源部分时间由**铅酸电池向负载供电**；其他时间由**整流设备直接向负载供电**的同时，还要**向铅酸电池充电(浮充)**，以补充铅酸电池放电时所消耗的能量以及因局部放电所引起的容量损失。

4. 2铅酸电池

□ 铅酸电池的充电放电特性

铅酸蓄电池充电曲线如图所示，其内部反应如下：



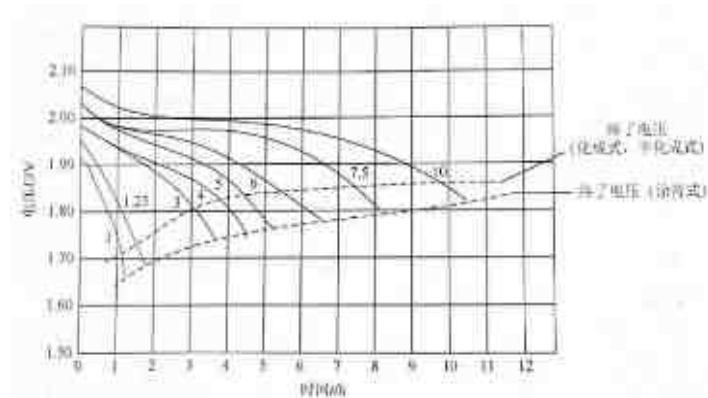
铅酸电池充电曲线图

- (1) 在电池充入电量至**70%~80%之前**，利用整流器的限流特性维持充电电流不变，此过程**电池端电压几乎呈直线上升**；
- (2) 当**电池的端电压上升至稳压点附近**时，由于充电历程已到中后期，所以电化极化作用已经变小，而电池内阻也明显减少，**电池内电流迅速衰减**。
- (3) 当**充电至后期**，**电池电流已明显变小**，所以浓差极化作用随之减小。而电化极化作用影响又增加，所以电池电流继续衰减，只是衰减速度变慢。
- (4) **充电末期**，充入电池的电流大部分用于维持电池内氧循环，仅极小的电流用于维持活性物质的恢复，因而**电池电流稳定不变**。

4. 2铅酸电池

□ 铅酸电池的充电放电特性

不同放电率的铅酸蓄电池放电曲线如图所示，其内部反应如下：



铅酸电池放电曲线图

- (1)在**放电初期**，**端电压U下降很快**，这是因为在放电初期，电动势**E**明显减小，同时内电阻**r**的明显减小也使内电阻电压降 **I_r** 有较大减小，端电压**U**也将快速减小。
- (2)在**放电中期**，由于活性物质微孔内的电解液逐渐扩散，其浓度趋于平衡，使**电动势E**和**内电阻r**的减小变得缓慢，也使端电压**U**缓慢减小。
- (3)**放电后期**，**端电压的下降将变快**，当放电电压下降到终止电压(**1.8V**)时，蓄电池应立即停止放电，这时，端电压将很快恢复到**2.0V**左右，如果不立即停止放电，蓄电池的端电压将急剧下降，同时对蓄电池的使用寿命也将产生不利影响。

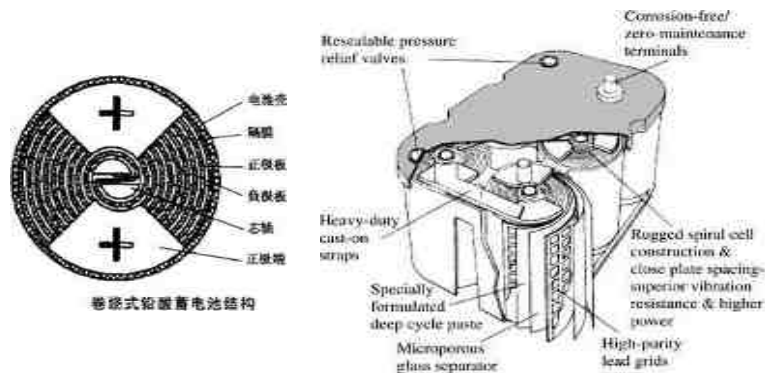
4. 2铅酸电池

技术演变——电极形态

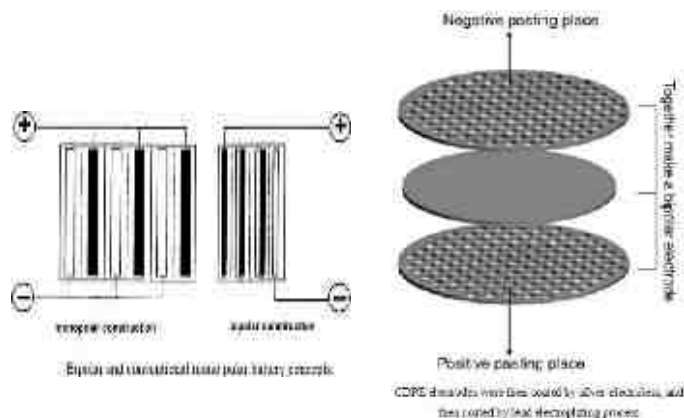
卷绕式铅酸蓄电池是螺旋型结构，采用压延铅合金的方式制造出了很薄的铅箔作为极板基片，将正极板、隔板、负极板交替叠放卷绕在一起。

双极性电极——是一面有正极活性物质而另一面有负极活性物质的坚实薄片极板

（中间的集流体不能导通溶液）。
相同容量的双极性电池比传统铅酸电池节约铅**30%**、重量降低**20%**



卷绕式铅酸电池

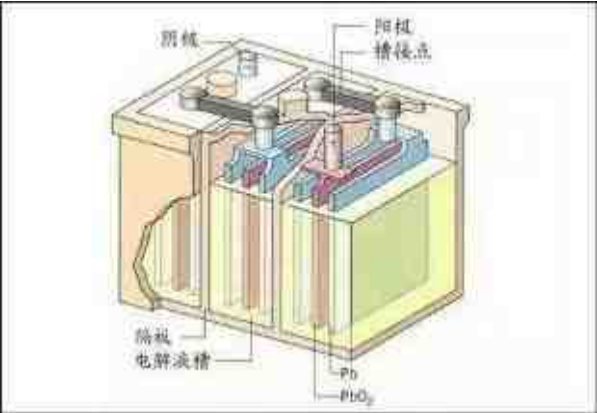


双极性铅酸蓄电池

4. 2铅酸电池

□ 铅炭电池

铅炭电池将具有双电层电容特性的炭材料（**C**）与海绵铅（**Pb**）负极进行合并制作成既有电容特性又有电 池特性的铅炭双功能复合电极（简称铅炭电极），铅 炭复合电极再与**PbO2**正极匹配组装成铅炭电池。
正 极是二氧化铅，负极是铅-炭复合电极，其开路电压 和基本电池反应同传统铅酸电池。



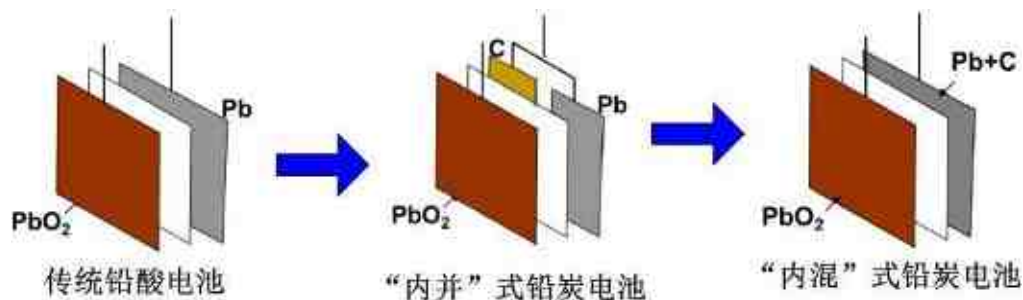
铅炭电池结构示意图

铅炭电池兼具铅酸电池与超级电容的特点，大幅改善了传统铅酸电池各方面的性能，其技术特点如表所示：

优势	劣势
(1) 成本低廉、制造工艺简便 (2) 能量成本低 (3) 工作温度范围宽泛，低温性能好于锂电池无需单体BMS	(1) 比功率、比能量偏低充电速率低，满充需要14-16小时 (2) 需防止不可逆硫酸盐化 (3) 循环寿命短，重复深度充放减少电池寿命 (4) 回收困难，对环境有害

4.2 铅酸电池

- ◆ 铅炭电池的核心是在负极引入活性炭，使电池兼具铅酸电池和超级电容器的优势，能够显著提高铅酸电池的寿命，同时可有效抑制普通铅蓄电池负极不可逆硫酸盐化的问题，使其大电流充放电性能和循环寿命得到显著提升。
- ◆ 由于铅炭电池在安全性、经济性和循环寿命等方面展现出优异的性能，使其在混合动力电动汽车、可再生能源接入、削峰填谷、智能微电网和需求侧管理等领域得到国内外人士的广泛关注。



铅炭电池组成方式示意图

4. 2铅酸电池

□ 铅酸电池的应用场景

尽管铅酸电池比能量和比功率较低，相对于各类储能电池，铅酸电池以其技术最成熟、性价比高，仍然在储能系统和工业备用电源中占据主导位置。目前不同类型铅酸电池的应用情况如表所示：

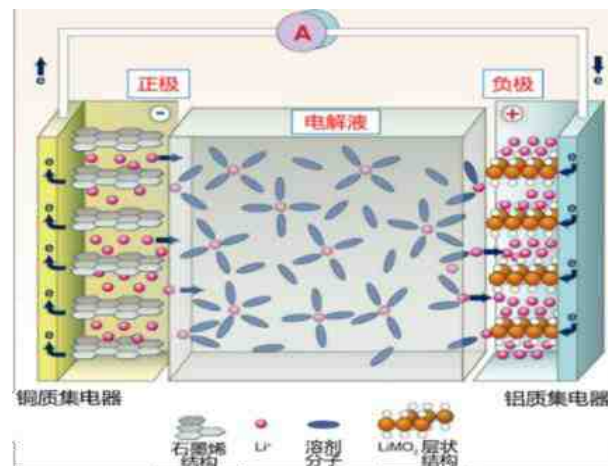
铅酸电池类型	应用
密封铅酸电池 (SLA)	小型UPS、应急照明
阀控密封铅蓄电池 (VRLA)	电力储能，通讯、银行、医院、机场的电力备用
铅炭电池	混合动力汽车、电动自行车、风光发电储能。

铅酸蓄电池由于材料廉价、工艺简单、技术成熟、自放电低和免维护要求等特性，在未来几十年里，依然会在市场中占主导地位，虽然起动用、动力用电池的市场空间可能会有拐点，在近期国家产业发展中仍将占主流地位，中期也将占有一席之地，长期来看，在不需要高重量比能量的用途领域还将继续存在。

4.3 锂离子电池

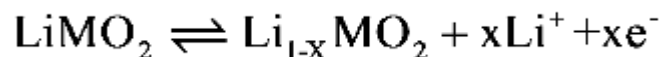
□ 锂离子电池的原理

锂离子电池是以锂离子为活性离子，充放电时集电器中的锂离子经过电解液在正负极之间脱嵌，将电能储存在嵌入（或插入）锂的化合物电极中的一种储能技术，它主要依靠锂离子在两个电极之间往返游走来工作，是目前能量密度最高的实用二次电池。



锂离子电池工作原理示意图

电池正极反应如下：



电池负极反应如下：



电池总反应如下：



4.3 锂离子电池

锂离子电池正极材料研究现状：

锂离子电池的活性正极材料大多数是含锂的过渡金属化合物，而且以氧化物为主。按电极材料可划分为钴酸锂、镍酸锂、锰酸锂、磷酸铁锂、三元锂离子等。目前已用于锂离子电池规模生产的正极材料为LiCoO₂。

材料名称	理论比容量 (mAh/g)	实际比容量 (mAh/g)	电位平台 (V)	特点
LiCoO ₂	275	130-149	4	性能稳定，高比容量，放电平台平稳
LiNiO ₂	274	170-180	4	高比容量，价格较低，热稳定性较差
LiMn ₂ O ₄	148	100-120	4	低成本，高温循环，存放性能较差

4.3 锂离子电池

锂电池依据正极材料的不同可分为：钴酸锂电池、锰酸锂电池、磷酸铁锂电池、三元锂电池（镍钴锰酸锂、镍钴铝酸锂）等。三元材料一般是指化学组成为 $\text{LiNi}_x\text{XbCo}_c\text{O}_2$ 的材料，其中 X 为 Mn （锰）时指 **NCM**（镍钴锰酸锂），而 X 为 Al （铝）时指 **NCA**（镍钴铝酸锂）。

正极材料	理论容量 (mAh/g)	额定电压 /V	成本	安全性	循环次数 /100%DOD
钴酸锂	274	3.7	高	一般	~500
锰酸锂	148	3.7	低	好	~300
磷酸铁锂	170	3.2	低	很好	>3500
镍钴锰酸锂	275	3.7	高	好	>4500
镍钴铝酸锂	275	3.6	低	好	> 500

三元材料兼顾了镍酸锂的高容量、高电压、锰酸锂的高压高安全性，钴酸锂的良好循环性，同时克服了锰酸锂镍酸锂合成困难且不稳定、钴酸锂成本高的缺点。充放电倍率高 **1~3C**，工作温度范围宽 **-20~60°C**，循环寿命长。

4.3 锂离子电池

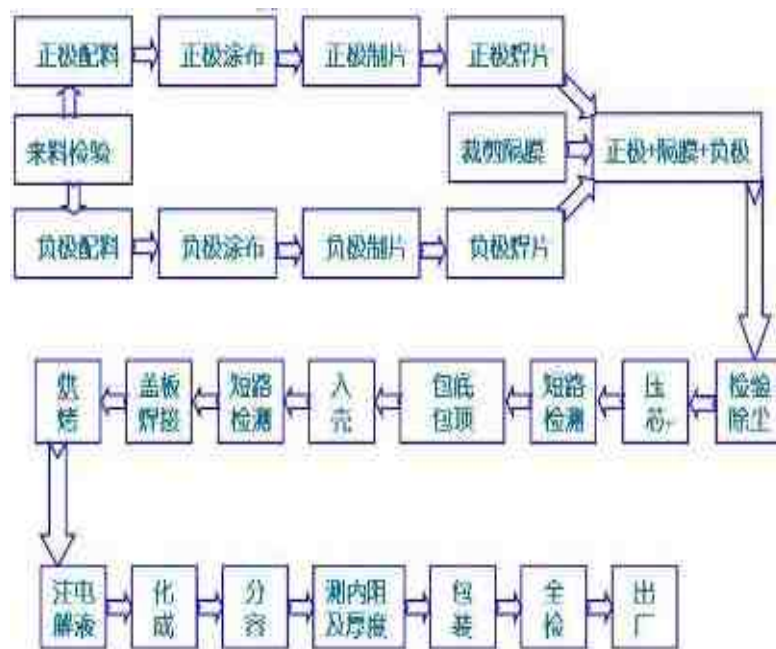
锂离子电池生产工艺流程：

整体上可将锂电制造流程划分为前段工序（极片制造）、中段工序（电芯合成）、后段工序（化成封装）。

前段工序的生产目标是完成（正、负）极片的制造。

中段工序的生产目标是完成电芯的制造，不同类型锂电池的中段工序技术路线、产线设备存在差异。

后段工序的生产目标是完成化成封装。后段工序的意义在于将其激活，经过检测、分选、组装，形成使用安全、性能稳定的锂电池成品。



锂离子电池工艺流程图

4.3 锂离子电池

锂离子电池类型:



4.3 锂离子电池

1、圆柱形锂离子电池



圆柱形锂离子电池



圆柱形锂离子电池结构示意图

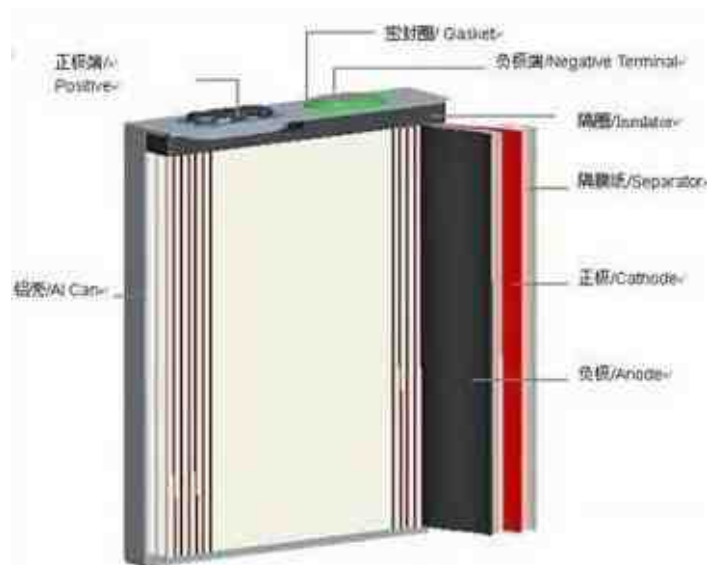
- ◆ 典型圆柱形电池的结构包括：外壳、盖帽、正极、负极、隔膜、电解液、PTC元件、垫圈、安全阀等。
- ◆ 圆柱形锂离子电池外壳为电池的负极，盖帽为电池的正极，电池外壳采用镀镍钢板。

4.3 锂离子电池

2、方形锂离子电池



方形锂离子电池



方形锂离子电池结构示意图

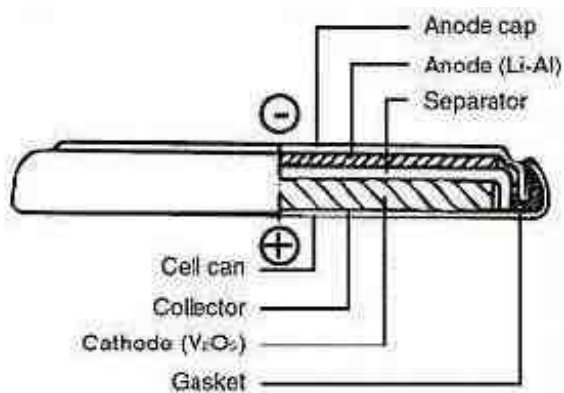
- ◆ 典型方形锂电池主要组成部件包括：顶盖，壳体，正极板、负极板、隔膜组成的叠片或者卷绕，绝缘件，安全组件等。
- ◆ 方形锂离子电池电解质为液态时，使用钢壳；若使用聚合物电解质，则可以使用铝塑包装材料。

4.3 锂离子电池

3、纽扣锂离子电池



纽扣锂离子电池



纽扣锂离子电池结构示意图

- ◆ 纽扣电池也分为化学电池和物理电池两大类，其化学电池应用最为普遍。
- ◆ 纽扣电池由阳极 (正极)、阴极 (负极) 及其电解液等组成。
- ◆ 纽扣电池的外表为不锈钢材料，并作为正极，其负极为不锈钢的圆形盖，正极与 负极间有密封环绝缘，密封环除起**绝缘作用**外，还能**阻止电解液泄漏**。
- ◆ 纽扣电池因**体形较小**，故在各种微型电子产品中得到了广泛的应用。

4.3 锂离子电池

□ 锂离子电池的特点

锂离子电池也具备循环寿命长、能效高、能量密度大和绿色环保等优势，随着锂离子电池制造成本的降低以及政策的推出落地，锂离子电池将大规模装机到电化学储能领域，有望在储能领域迎来大幅度增长。但锂离子电池也存在一些缺点，例如价格较贵和安全性较差等。

锂离子电池优劣势如表所示：

优势	劣势
(1) 高能量密度，高功率密度 (2) 能量转换效率高，95%以上 (3) 长循环寿命 (4) 可快充快放，充电倍率一般在0.5~3C	(1) 采用有机电解液，存在较大安全隐患 (2) 循环寿命和成本等指标尚不能满足电力系统储能应用的需求 (3) 不耐受过充和过放 (4) 使用循环中不可避免自然缓慢衰退 (5) 低温下（≤0℃）不易实现快充快放

4.3 锂离子电池

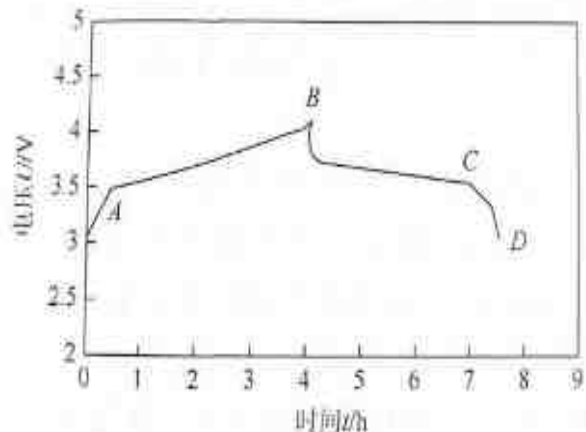
□ 锂离子电池的充放电特性

充电过程：

- ◆ 随着锂离子充电电流的增加，恒流时间逐步减少，恒流可充入容量和能量也逐步减少。
- ◆ 在实际电池组应用中，以锂离子电池允许的最大充电电流充电，达到限压后，再进行恒压充电，这样在减少充电时间的基础上，也保证了充电的安全性；
- ◆ 应综合考虑充电时间和效率，选择适中的充电电流，以减少内阻能耗。

放电过程：

- ◆ 电池在初始阶段端电压快速下降，放电倍率越大，电压下降的越快；
- ◆ 随后，电池电压进入一个缓慢变化的阶段，这段时间称为电池的平台区，放电倍率越小，平台区持续的时间越长，平台电压越高，电压下降越缓慢；
- ◆ 在电池电量接近放完时，电池负载电压开始急剧下降直至达到放电截止电压。



锂离子电池基本充电放电电压曲线

4.3 锂离子电池

□ 锂离子电池的应用场景

在锂离子电池中，不同类型的电池可根据实际需求应用在适宜的场所当中，如表所示：

锂离子电池类型	特点	应用
磷酸铁锂（LFP）	原料价格低且磷、锂、铁存在于地球的 资源含量丰富 ，工作电压适中、电容量大、高放电功率、可快速充电且循环寿命长，在高温与高热环境下的稳定性高。	目前应用的领域包括新能源汽车、储能、5G基站、二轮车、重卡、电动船舶等。
钴酸锂（LCO）	钴酸锂在 高比能量方面表现出色 ，但LCO 成本较高 ，难以应用在耐受穿刺、冲撞和高温、低温等条件等特殊环境。	主要用于制造手机和笔记本电脑及其它便携式电子设备。
锰酸锂（LMO）	锰酸锂 成本低、无污染 ，制备容易，最大的缺点是高温容量衰减较为严重。	适用于大功率低成本动力电池，可用于电动汽车、储能电站以及电动工具等方面。
镍锰钴酸锂NMC（三元）	高电压正极材料镍锰钴酸锂 具有较高的比能量和比功率 ，一度被产业界认为是最成功的锂离子体系之一，但安全性还无法有更大突破。	主要应用于锂离子电池正极材料。如动力电池、圆柱电池等。
镍钴铝酸锂NCA（三元）	具有 较高的比能量、比功率 和长的使用寿命与NMC有相似之处。缺点是安全性和成本。	主要用于医疗设备，工业，电动动力汽车等。
钛酸锂	钛酸锂 可快速充电 ，钛酸锂电池放电倍率搞，循环次数比普通锂电池高，同时 更安全，低温放电特性优异 。	主要用于不间断电源、太阳能路灯、电动动力汽车等。

4.3 锂离子电池

□ 锂离子电池的能量转换效率

锂离子电池充放电效率应为评价周期内，储能单元总放电量与总充电量的比值，按下式计算：

式中：

$$\eta_{ESU} = \frac{E_D}{E_C} \times 100\%$$

为储能单元充放电能量效率，%

η_{ESU} 为评价周期内储能单元总的放电量，单位为千瓦时（kW·h）；

E_D 为评价周期内储能单元总的充电量，单位为千瓦时（kW·h）。

E_C
例4-1 电化学储能系统中锂离子电池的储能总放电量为2.6kw·h，总充电量为3.2 kw·h，试问该电池的能量转换效率为多少？

解：锂离子电池充放电转换效率公式为：

所以，

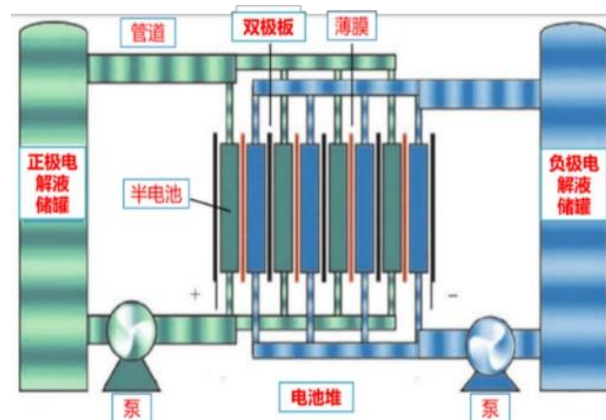
$$\eta_{ESU} = \frac{E_D}{E_C} \times 100\%$$

$$\eta_{ESU} = \frac{E_D}{E_C} \times 100\% = \frac{2.6}{3.2} \times 100\% = 81.25\%$$

4. 液流电池

□ 液流电池的原理

- ◆ 液流电池单体包括：正、负电极；薄膜、及其与电极围成的电极室；电解液储罐、泵和管道系统。
- ◆ 液流电池的正极和负极电解液分别装在两个储罐中，利用送液泵使电解液通过电池循环。在电堆内部，正、负极电解液用离子交换膜（或离子隔膜）分隔开，电池外接负载和电源。
- ◆ 液流电池技术通过反应活性物质的价态变化实现电能与化学能相互转换与能量存储。
- ◆ 在液流电池中，活性物质储存于电解液中，具有流动性，电池功率与容量设计相对独立，适合大规模蓄电储能需求。



液流电池工作原理图

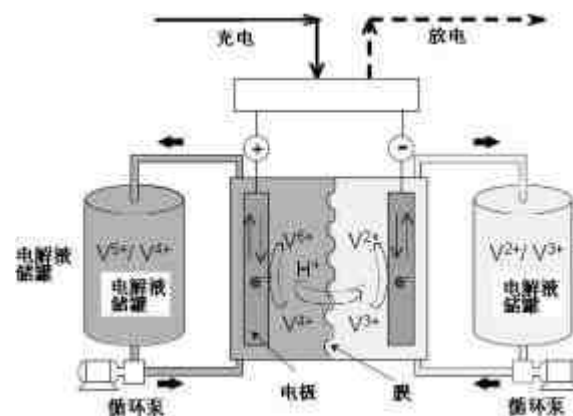


液流电池储能系统实物图

4. 液流电池

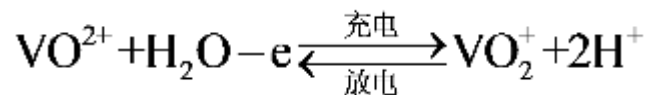
➤ 全钒液流电池

- ◆ 全钒液流电池以五价钒和四价钒离子的硫酸溶液为正极电解液，以三价钒和二价钒离子的硫酸溶液为负极电解液，由离子交换膜隔开。
- ◆ 电池电能以化学能的方式存储在不同价态钒离子的硫酸电解液中，通过循环泵把电解液压入电池堆内，在机械动力作用下，使其在不同的储液罐和半电池的闭合回路中循环流动，电解质溶液平行流过电极表面并发生电化学反应，通过双极板收集和传导电流，从而使得存储在溶液中的化学能转换为电能。

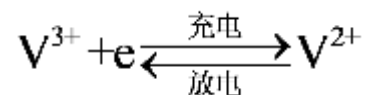


全钒液流电池工作原理图

正极电对： $\text{V(V)}/\text{V(IV)}$



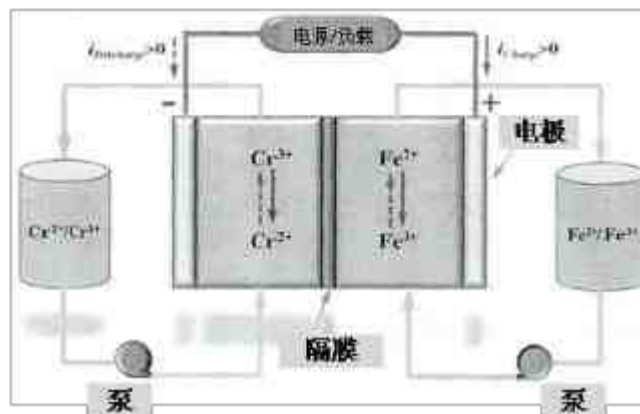
负极电对： $\text{V(III)}/\text{V(II)}$



4. 液流电池

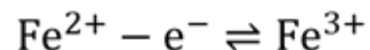
➤ 铁铬液流电池

- ◆ 铁铬电池分别采用 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 电对和 $\text{Cr}^{3+}/\text{Cr}^{2+}$ 电对作为正极和负极活性物质，通常以盐酸作为支持电解质。
- ◆ 电解液通过循环泵进入到两个半电池中， $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 电对和 $\text{Cr}^{3+}/\text{Cr}^{2+}$ 电对分别在电极表面进行氧化还原反应，正极释放出来的电子通过外电路传递到负极，而在电池内部通过离子在溶液的移动，并与离子交换膜进行质子交换，形成完整的回路，从而实现化学能与电能的相互转换。

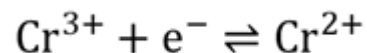


铁铬液流电池工作原理图

正极电对：Ⅴ(V)/Ⅳ(IV)



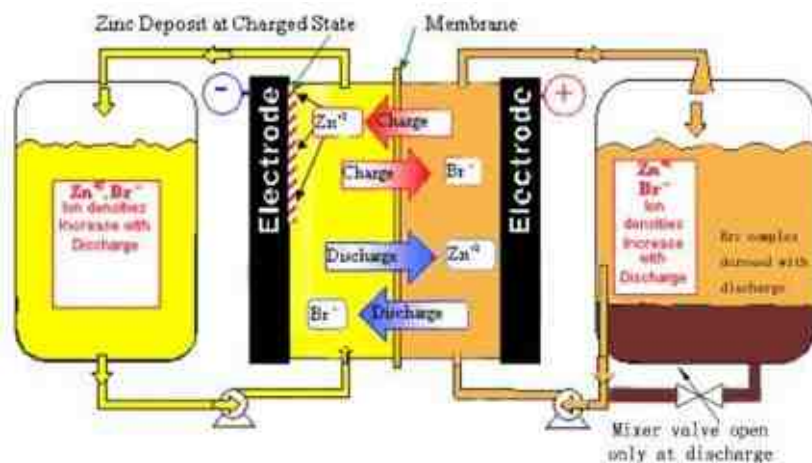
负极电对：Ⅲ(III)/Ⅱ(II)



4. 液流电池

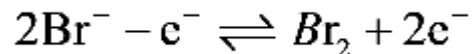
➤ 锌溴液流电池

- ◆ 锌溴氧化还原液流电池是一种将能量储存在溶液中的电化学系统。
- ◆ 正负半电池由隔膜分开，两侧电解液为 ZnBr_2 溶液。在动力泵的作用下，**电解液在储液罐和电池构成的闭合回路中进行循环流动。**
- ◆ 充电过程中，负极锌以金属形态沉积在电极表面，正极生成溴单质；放电时在正负极上分别生成锌离子和溴离子。

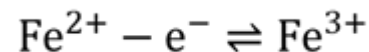


锌溴液流电池工作原理图

正极电对：Ⅴ(V)/Ⅴ(IV)



负极电对：Ⅴ(Ⅲ)/Ⅴ(Ⅱ)



4. 4液流电池

液流储能电池作容量调节范围宽、充放电效率高、循环寿命长、响应迅速和环境友好的储能技术，有广阔的应用前景和巨大的市场潜力。不同液流电池主要特点及应用范围如表所示：



液流电池实物图

液流电池类型	特点	应用
全钒液流电池	能量密度较低，成本过高。	削峰填谷、需求响应、延缓电力系统升级改造、偏远地区供电、分布式发电、智能电网与微电网等场景。
锌溴液流电池	能量密度高、材料成本较低且对环境友好。	相对集中于工/商业用户、偏远地区、军方等用户侧场景。
铁铬液流电池	电池成本较低且无污染，制备较为容易。	可再生能源发电平滑输出、跟踪计划发电、需求响应、延缓电力系统升级改造、偏远地区供电、分布式发电、智能电网与微电网等场景。

4. 液流电池

液流电池的特点

液流电池和通常以固体作电极的普通蓄电池不同，液流电池的活性物质以液体形态储存在于两个分离的储液罐中，由泵驱动电解质溶液在独立存在的电池堆中反应，电池堆与储液罐分离，在常温常压运行，因此安全性高，没有潜在爆炸风险。液流电池特点如表所示：

优势	劣势
(1)长服役寿命：充放电循环次数>10000次，日历寿命可达20年。充放电无衰减，电解液通过再平衡可永久使用。 (2)通用性：电池的输出功率和容量由于彼此独立设计，液流电池可以定制化设计，易于扩容。 (3)安全性高：液流电池电解液由不可燃材料组成，正常工作下电池起火可能性极低。 (4) 响应速度快、自放电率低且对环境友好	(1)系统相对复杂：液流电池储能系统需要泵、传感器、流量和电源管理，以及储罐。 (2)能量密度低：液流电池能量密度相比其他电化学储能技术较低。

4. 4液流电池

□ 液流电池的分类

根据参与反应的活性物质的不同，液流电池可以分为全钒液流电池、锌溴液流电池、多 硫化钠/溴液流电池、锌/镍液流电池、铁/铬液流电池、钒/多卤化物液流电池、锌/ 铈 液流电池和半液流电池。

电池种类	技术成熟度	能量密度	功率密度	功率等级	持续发电时间
全钒液流电池	示范	15-40Wh/kg	50-100W/kg	0.03-10MW	秒-小时
锌溴液流电池	示范	65Wh/kg	200W/kg	0.05-2MW	秒-小时
铁铬液流电池	示范	15-40Wh/kg	50-100W/kg	0.03-10MW	秒-小时
电池种类	能量转换效率	自放电率	循环次数	服役年限	响应速度
全钒液流电池	75-85%	低	>15000次	20年	毫秒级
锌溴液流电池	75-80%	10%/月	5000次	10年	毫秒级
铁铬液流电池	75-85%	低	>15000次	20年	毫秒级

4.4 液流电池

□ 液流电池的能量转换效率

液流电池充放电效率应为评价周期内，储能单元净放电量与充电量加上充电过程辅助能耗之和的比值，按下式计算：

式中：

$$\eta_{ESU} = \frac{E_{sD} - W_{sD}}{E_{sC} + W_{sC}} \times 100\%$$

为储能单元充放电能量效率，%

η_{ESU} 为评价周期内储能单元总的放电量，单位为千瓦时（kW·h）；

E_{sD} 为评价周期内液流电池储能单元放电过程辅助设备的能耗，单位为千瓦时（kW·h）；

W_{sD} 为评价周期内储能单元总的充电量，单位为千瓦时（kW·h）；

E_{sC} 为评价周期内液流电池储能单元放电过程辅助设备的能耗，单位为千瓦时（kW·h）；

W_{sC}
例4-2 电化学储能系统中液流电池的储能总放电量为**2.6kw h**，总充电量为**3.2 kw h**，储能单元放电和充电过程辅助设备的能耗分别为**0.2 kw·h**和**0.15 kw·h**，试问该电池的能量转换效率为多少？

解：锂离子电池充放电转换效率公式为：

所以，

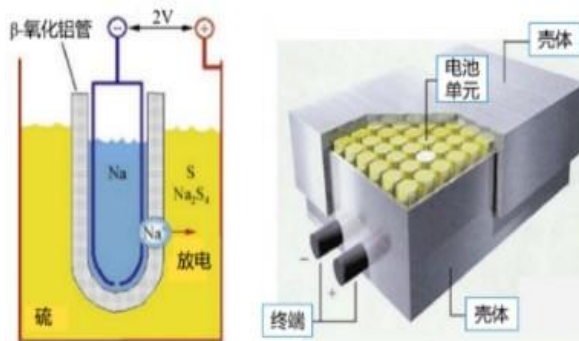
$$\eta_{ESU} = \frac{E_{sD} - W_{sD}}{E_{sC} + W_{sC}} \times 100\%$$

$$\eta_{ESU} = \frac{E_{sD} - W_{sD}}{E_{sC} + W_{sC}} \times 100\% = \frac{2.6 - 0.2}{3.2 - 0.15} \times 100\% = 78.69\%$$

4.5钠硫电池

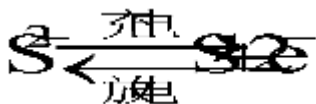
□ 钠硫电池的原理

钠硫电池是高温钠系电池的一种，是以金属钠为负极、硫为正极、陶瓷管为电解质隔膜的熔融盐二次电池。电池采用加热系统把不导电的固态盐类电解质加热熔融，使电解质呈离子型导体而进入工作状态。钠离子透过电解质隔膜与硫之间发生可逆反应，形成能量的释放和储存。

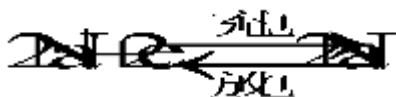


钠硫电池结构及工作原理图

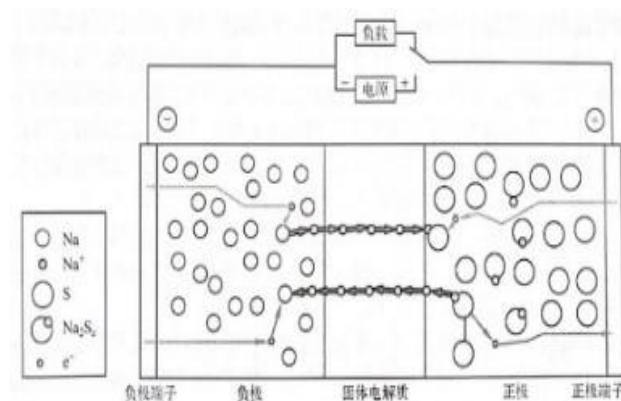
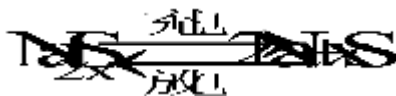
电池正极反应如下：



电池负极反应如下：



电池总反应如下：



钠硫电池工作原理图

4. 5钠硫电池

□ 钠硫电池的特点

能够进行大电流、高功率放电，充放电效率很高，仅能在**300-350°C**的温度下工作，系 统规模可根据应用需求通过钠硫电池模块集成灵活扩展，达到**MW**级别；此外还具有无 放电污染、无振动、低噪声、环境友好等优点。

钠硫电池的优劣势如表所示：

优势	劣势
(1) 比能量和比功率高 ：理论比能量为760Wh/kg，实际可达150~300Wh/kg； (2) 低成本潜力 ：原材料和密封材料成本较低，无维护配置； (3) 运行状态灵活：电池单体可在较宽条件下运行（速率、放电深度、温度）； (4) 库伦效率高：几乎为100%； (5) 不受环境影响 ：可在密闭，高温情况下运行。	(1) 运行温度在300°C以上 ； (2) 金属钠的剧烈反应特性：液态的钠与硫在直接接触或遇水会发生剧烈放热反应，给储能系统带来很大 安全隐患 ； (3) 结构防渗透密封会增加额外的成本； (4) 操作和维护要求比较严格。

4. 5钠硫电池

□ 钠硫电池的应用场景

钠离子电池体系中除了钠硫电池，还有钠基电池、钠-氯化镍（Zebra）电池和室温钠离子电池，其应用情况如表所示。

钠基电池类型	技术应用
高温钠硫电池	自2002年起，日本NGK公司开始钠硫电池的商业化开发，也是世界上唯一能制造出高性能钠硫电池的厂商。最初公司采用50kW模块（后因安全问题改成33kW模块），可由多个模块组成MW级大容量的电池组件，在日本、美国、加拿大、意大利已建有超过200多处钠硫电池储能电站，主要应用于负荷调平、电网削峰填谷、大规模可再生能源并网、改善电能质量等领域。
Zebra电池	钠-氯化镍（Zebra）电池(以下称Zebra电池)为一种零排放无污染的绿色电源，是在NaS电池研制基础上发展起来的。Zebra电池的主要研发企业为美国GE公司，2011年斥资建造了年产能1GWh的Zebra电池制造工厂，所生产的Durathon电池自2012年开始实现了商业应用。主要应用于通讯基站、移动设备的备用电源，大型静态储能电站。
室温钠离子电池	室温钠离子电池自2010年以来受到国内外学术界和产业界的广泛关注。目前国内外有10余家企业（英国法拉第公司，美国Natron Energy公司，法国TIAMAT公司，日本岸田、丰田、松下、三菱等公司，以及我国中科海钠、钠创新能源、辽宁星空等公司）正在进行相关中试技术研发，并取得了重要进展。目前用于低速电动汽车以及部分低续航乘用车领域。

4.6 常用电化学储能的对比

针对铅酸电池、锂离子电池、液流电池、钠硫电池储能技术的应用、自身特点等，总结 归纳如下。

	铅酸电池	磷酸铁锂 电池	钛酸锂 电池	镍钴锰 酸锂	钠硫电池	全钒液流 电池
容量规模	百MWh	百MWh			百MWh	百MWh
功率规模	几十MW	百MW			几十MW	几十MW
能量密度 /Wh▪kg ⁻¹	40-80	80-170	60-100	120-300	150-300	12-40
功率密度 /W▪kg ⁻¹	150-500	1500-2500	>3000	3000	22	50-100
响应时间	ms	ms			ms	ms
循环次数	500-3000	2000- 10000	>10000	1000-5000	4500	>15000
寿命	5-8年	10年			15年	>20年
充放电 效率	70-90%	>90%	>90%	>90%	75%-90%	75%-85%
投资成本/ 元▪kWh ⁻¹	800-1300	800-1200	4500	1200-2400	~4000	2500- 3900
优势	成本低，可回 收含量高	效率高、能量密度高、响应快			效率高、能 量密度高、 响应快	循环寿命高、 安全性能好
	能量密度低、				需要高温条	能量密度低、

4.6 常用电化学储能的对 比

电池储能成本对比

年限	储能类型	投资成本(元/kWh)
2013年	锂离子电池	4500~6000
	铅酸电池	1400~1500
	全钒液流电池	3500~4500
2015年	锂离子电池	2500~3000
	铅酸电池	800~1300
	全钒液流电池	3500~3900
2017年	锂离子电池	2000~2500
	铅酸电池	800~1000
	全钒液流电池	2500~3000
2020年	锂离子电池	1000~1500
	铅酸电池	500~600
	全钒液流电池	~2000

近几年来，随着可再生能源、电动汽车、需求响应等技术的发展，电池储能得到了广泛的应用，投资成本显著下降。

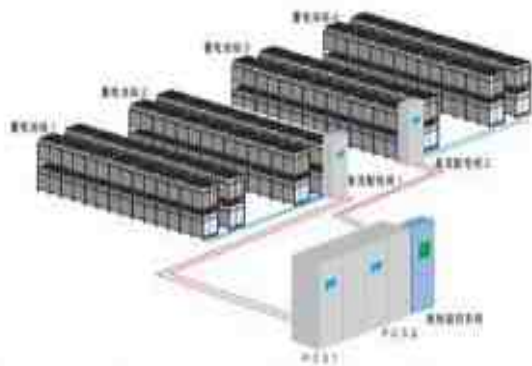
以铁锂电池为例：
2010年，初始投资成本为5000元/kWh
2015年下降为2500元/kWh
2017年下降为2000元/kWh

4.7 电化学储能特性分析

- ◆ 目前储能技术总体要考虑到能量密度、功率密度，响应时间、效率以及经济性、安全和环保性等因素。
- ◆ 为此，**电化学储能技术需要具备高效率、低成本、长寿命、高安全、低污染、易回收的特性。**
- ◆ 在实际工程中，应根据储能技术的上述特征，应用目的和需求来选择种类、安装地点、容量及各种技术的配合，还要考虑投资成本。



电池单体

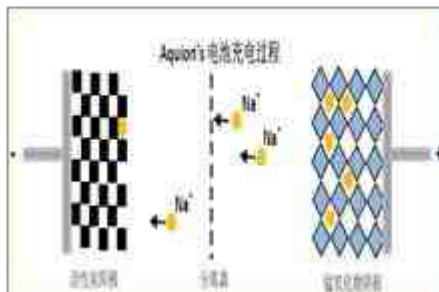


电池储能系统放置示意图

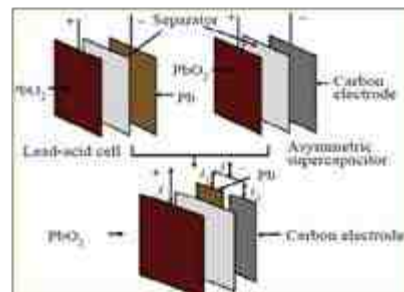
4.7 电化学储能特性分析

一些新型电池技术

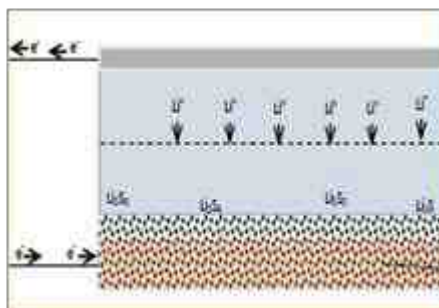
- ◆ 随着研究的不断深入，一些新型电池技术的潜在优势被不断发掘。
- ◆ **钠离子电池**成本较低、在高、低温下性能优异以及较高的安全性；
超级电池充电速度快、循环寿命长；
- ◆ **钠/氯化镍电池**安全性好、可靠性高、无自放电、充放电性能好；
- ◆ **锂硫电池**原材料储量丰富，成本低、比容量和比能量较高且对环境友好。
- ◆ 上述新型电池技术均在储能和动力领域的应用中有着良好的发展前景。



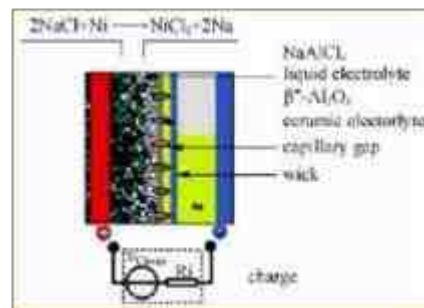
钠离子电池



超级电池



钠/氯化镍电池



锂硫电池

总结与展望

- 电化学储能通过储能电池完成**能量储存、释放与管理**过程；
- 电化学储能技术在电力系统中应用广泛，应用于**发电、输电、配电、送电等四个环节**；
- 铅酸电池的**电极由铅及其氧化物制成，电解液采用硫酸溶液**。放电状态下，正极主要成分为二氧化铅，负极主要成分为铅；充电状态下，正负极的主要成分均为硫酸铅。
- 锂离子电池是**目前能量密度最高的实用二次电池**，锂离子电池是以锂离子为活性离子，充放电时集电器中的锂离子经过电解液在正负极之间脱嵌，将电能储存在嵌入（或插入）锂的化合物电极中的一种电化学储能方式。
- 液流电池的**正极与和负极电解液分别装在两个储罐中**，利用送液泵使得电解液通过电池循环，并通过外接管路与流体泵使电解质溶液流入电池堆内进行反应。

总结与展望

- 钠硫电池是高温钠系电池的一种，钠离子透过电解质隔膜与硫之间发生可逆反应，形成能量的释放和储存。
- 铅酸电池原材料来源丰富、安全可靠、技术成熟、成本低廉；锂离子电池放电电压稳定，能量密度大，寿命较长，自放电率低；液流储能电池容量调节范围宽、充放电效率高、循环寿命长、响应迅速且对环境友好；钠硫电池体积能量密度高、质量功率密度大，工作温度高。
- 锂离子电池适用于对能量密度、循环寿命要求较高的大规模储能应用场景。液流电池非常适合规模化、长时间储能的应用场景。钠硫电池因其可在高温环境下工作，在电力系统有广阔的应用前景。
- 目前电化学储能技术需要具备高效率、低成本、长寿命、高安全、低污染、易回收的特性；
- 随着研究的不断深入，钠离子电池、超级电池、钠/氯化镍电池和锂硫电池等一些新型电池技术的潜在优势被不断发掘。

第五章 氢储能

- 氢储能概述
- 氢气制备与纯化
- 氢气储存
- 氢储能应用
- 总结与展望

5.1 氢储能概述

□ 氢储能的概念

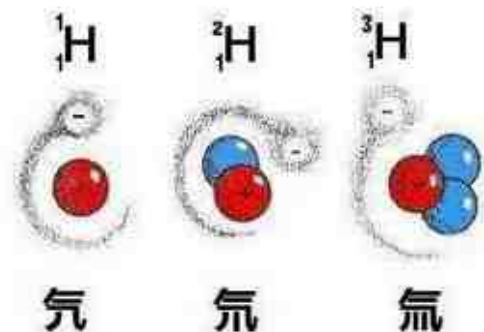
◆ 氢的物理化学性质

(1) 氢属于IA族，相对原子质量为**1.00794**。

(2) 氢原子由一个质子及一个电子组成，电子组态为**1s1**，电负性为**2.2**。

(3) 氢原子的基态能级为 **-13.6 eV**，电离能为**1312 kJ/mol**。自然界中氢有氕和氘两种同位素，该两种同位素分别含有**1个**及**2个**中子。

(4) 氢键是弱于化学键的一种静电键，是一种相互作用。右图是我国中科院国家纳米科学中心研究人员在实空间得到分子间氢键的高分辨率成像，实现了对于氢键键长和键角的直接测量。



5.1 氢储能概述

(5) 在室温下，氢气由**75%**的正氢和**25%**的仲氢组成。正氢分子两个质子自旋同向，仲氢分子两个质子自旋反向的。

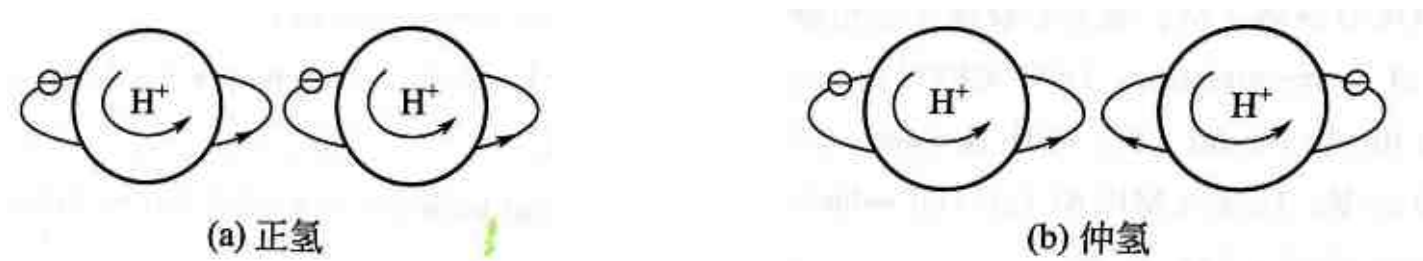


表5.1 氢气的物理性质

熔点	14.025K
沸点	20. 268K
密度	0. 089 kg/m³
摩尔体积	11. 42×10-³ (m³ mol)
比热容	14. 3 kJ/ (kg K)
热导率	0. 1815 W/ (m K)
电离能	1312. 06 kJ/mol
临界点	32. 976 K
汽化焓	0. 4494 kJ/mol

5.1 氢储能概述

◆ 氢储能

- (1) 氢储能的优点：储量丰富、燃烧热值高、可存储、可转化形式广。
- (2) 氢矿：将海水中的氢元素提出，燃烧产生的热量比化石燃料大9000倍。
- (3) 氢热值高，但密度小。

表5-2 氢与其他燃料的属性对照

	单位	氢气	天然气	汽油	石油	甲醇
密度	kg/m³	0.089 (气态) 71 (液态)	0.721	738	840	787
低热值	MJ/kg	120	50	47	39	20
	MJ/L	0.01 (气态)/8.52 (液态)	0.036	34.6	32.7	15.4
汽油当量	L	3200 (气态)	961	1	1.06	2.1

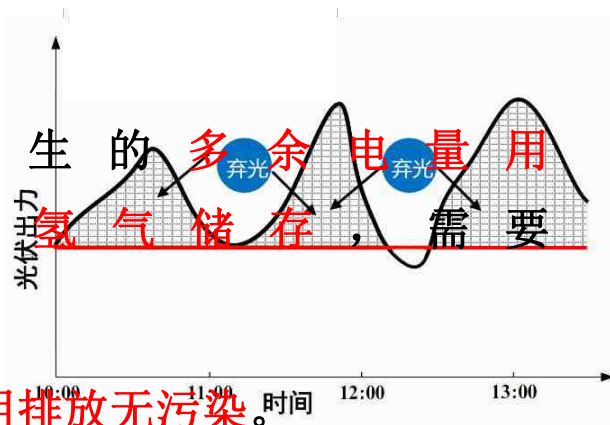
根据表5-2可知，获得燃烧1 kg氢气的能量，需要天然气和汽油约2.4kg及2.55 kg，在常温常压条件下，获得相同热量所需氢气的体积约是天然气的3.3倍。

5.1 氢储能概述

□ 氢储能的作用

◆ 调节电网波动性

(1) 氢储能系统首先将新能源产生的多余电量用来电解水制氢，随后将制得的氢气储存，需要用电时再通过燃料电池转化发电。



(2) 优点：原料来源不受限、可存储时间长、使用排放无污染。

◆ 部分代替化石能源

(1) 氢内燃机工作原理与汽油内燃机原理类似。(长征系列火箭---液氢燃料)

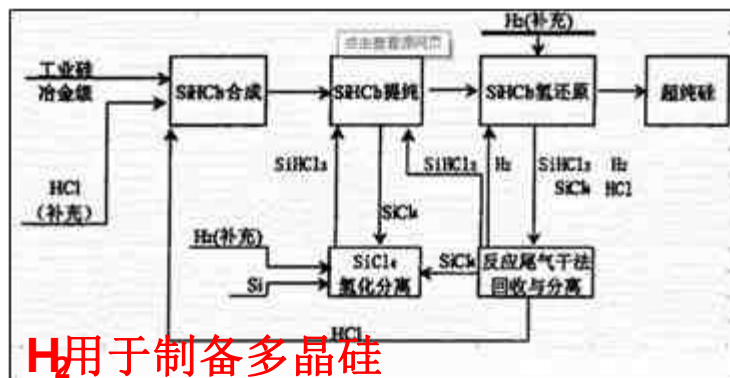
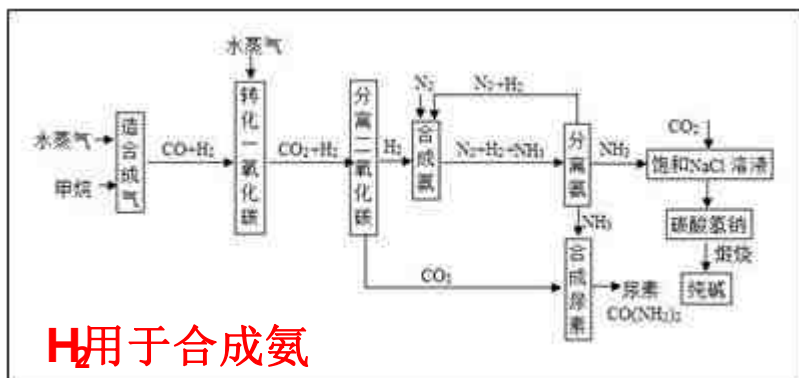
(2) 氢气代替部分煤气，通过氢气管道送往千家万户。



5.1 氢储能概述

◆ 充当化工原料

- (1) 氢气用于工业合成氨。（世界上约**60%**的氢是用于合成氨上）
- (2) 氢气用于工业制备多晶硅。
- (3) 在炼油工业中，燃料的精炼需要氢。石油炼制工业用氢量仅次于合成氨，主要用于石脑油、粗柴油、燃料油的加氢脱硫等方面。



据统计，目前全世界化学及炼油工业每年用氢量超过约**5500**亿立方米

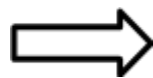
5.1 氢储能概述

□ 氢储能的主要环节

◆ 上游制备

(1) 化石能源重整制氢

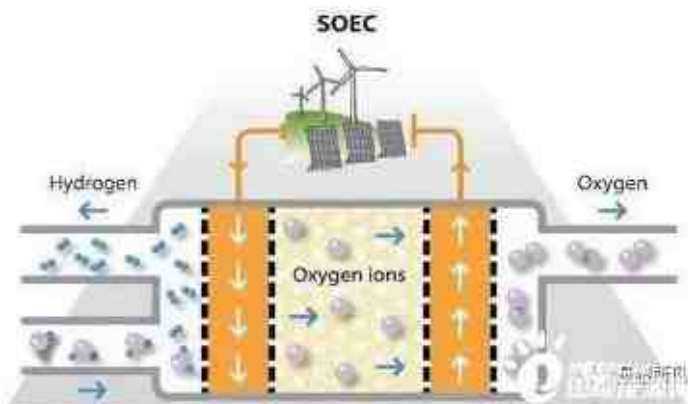
- 化石能源重整制氢是目前制氢的主流技术，可分为煤气化制氢、天然气水蒸气重整制氢、重油制氢。
- 优点：技术成熟，可大规模制氢。
- 缺点：碳排放量高，产氢含杂质多。



5.1 氢储能概述

(2) 电解水制氢

- 目前只占了制氢总量的约**4%**。
- 优点：没有任何温室气体的排放，制备的氢气纯度高。
- 缺点：成本及能耗高。主要原因是电价高，占总成本的约**70%**。
- 潜力：新能源装机“弃风弃光”电能的消纳及电价的下降，制氢成本有望在未来下降。



5.1 氢储能概述

(3) 新型制氢技术

➤ 生物质制氢

可分为**发酵制氢**和**热分解制氢**。

优点：**资源量大，分布广泛**，整个生命周期为**零CO₂排放**



➤ 光催化制氢

优点：使用**太阳光直接制氢**。

缺点：**仅限于实验室规模**，离实际应用还有一定的距离。



5.1 氢储能概述

◆ 中游储运

(1) 高压气态储运

- 特点：简便易行、成本低、充放气速度快、在常温下可以进行，技术比较成熟，是目前较常用的一种储氢技术。
- 先将氢气加压后装在高压容器中，其运输方式是使用牵引卡车或船舶进行较长距离的输送。



5.1 氢储能概述

(2) 低温液态储运

特点：**液氢储存体积能量密度大，适用于储存空间有限的场合。**液氢的运输通过在汽车、船舶或者飞机上配备低温绝热槽罐进行运输。



(3) 固态储运

特点：**工作压力低、系统体积小、放氢纯度高；**但也存在**质量储氢密度低、使用成本高、吸放氢有温度要求**等问题。目前处于小规模试验阶段，尚未产业化。

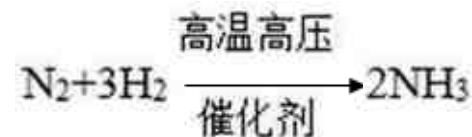
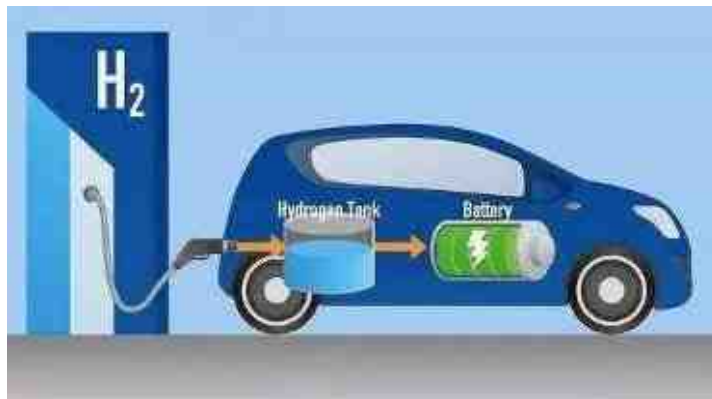
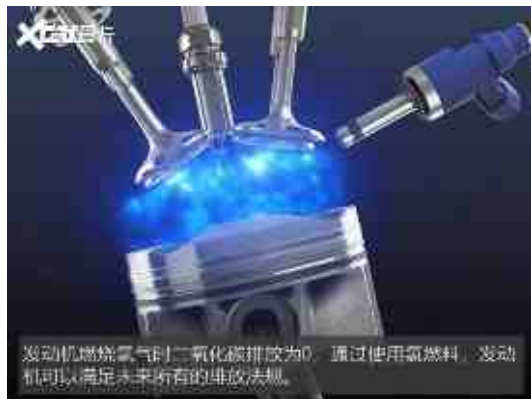


5.1 氢储能概述

◆ 下游应用

(1) 氢能的利用形式

- **直接燃烧**，即利用氢和氧发生反应放出的热能；
- **通过燃料电池转化为电能**，即利用氢和氧在催化剂作用下的电化学反应直接获取电能；
- **化学反应**，即在化工等行业中利用氢的还原性质。



5.2 氢气制备与纯化

□ 氢气制备原理

◆ 化石能源重整制氢

(1) 煤气化制氢

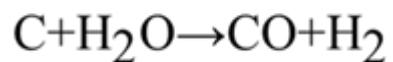
➤ 基本原理

以煤或煤焦为原料、以水蒸气作为气化剂，在高温高压下进行化学反应
将原料中的可燃部分转化为氢气

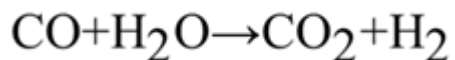
水蒸气转化反应

(5-1)

水煤气变换反应



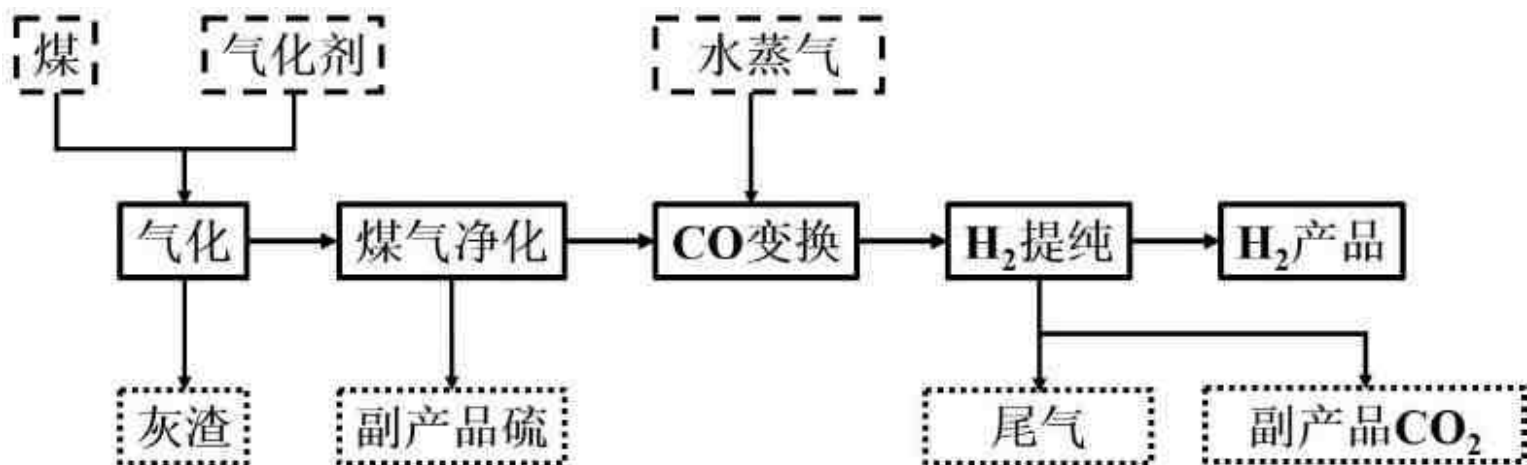
(5-2)



5.2 氢气制备与纯化

➤ 工艺流程

煤炭经过干燥后，煤分子在高温下发生热分解反应，**煤黏结成半焦**；
半焦则在更高温度下与通入气化炉的气化剂发生化学反应**生成粗煤气**；
净化粗煤气；
CO变换--水煤气变换反应；
提纯得到**H₂产品**。



5.2 氢气制备与纯化

(2) 天然气水蒸气重整制氢

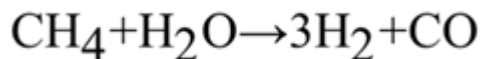
➤ 基本原理

天然气中的主要成分为甲烷（ CH_4 ），工业上常采用水蒸气与 CH_4 反应，**先生成合成气**，再经**化学转化与分离**，制备氢气。

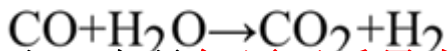
制备合成气反应

(5-3)

水煤气变换反应



(5-4)



由**甲烷**的分子式可以看出，它是**氢原子质量占比最大**的化合物，故理论上通过气化反应消耗**1mol CH_4** 产生的 **H_2** 要比消耗**1mol C** 产生的 **H_2** 多。

5.2 氢气制备与纯化

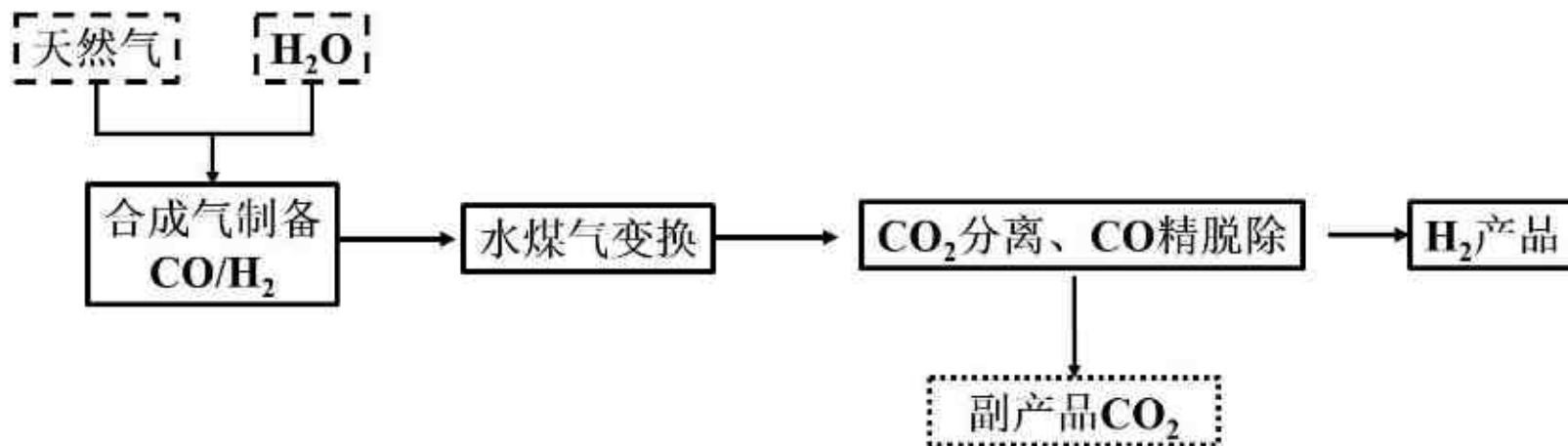
➤ 工艺流程

合成气制备

水煤气变换

CO₂分离

CO精脱除

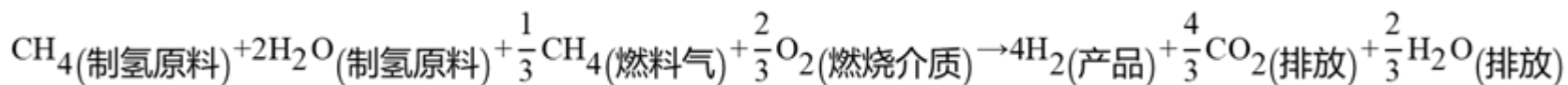


5.2 氢气制备与纯化

例5-1

在天然气水蒸气重整制氢中，假设水蒸气转化过程需要燃烧相当于**1/3**原料气的燃料来为反应提供热能。若将制氢原料与燃料气统筹计算，试问每生产**1t H₂**，大约放出多少**CO₂**。

解：由式(5-3)、(5-4)及题意可知，该反应过程可表示为



$$\frac{8}{1} = \frac{\frac{4}{3} \times 44}{x}$$

$$x = 7.3 \text{ t}$$

由上述反应方程式计算可知，在上述条件下，每生产**1t**氢气，大约放出的**CO₂**为**7.3t**。在实际中，由于气体分离、天然气开采、基建等过程均有碳排放的存在。据折算，以此方法每生产**1t H₂**，释放出的**CO₂**可能达到**10-11 t**。

5.2 氢气制备与纯化

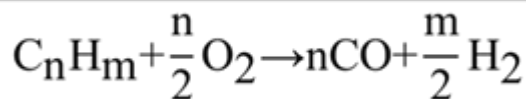
(3) 重油制氢

化石燃料中，通常不直接用石油制氢，而是用石油初步裂解后的产品，如重油制氢。重油是原油提取汽油、柴油后的剩余重质油。

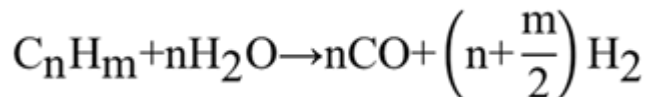


➤ 基本原理

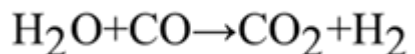
重油制氢的典型部分氧化反应方程式如式(5-5)、(5-6)、(5-7)所示，该反应过程在一定的压力下进行，重油制氢可选择不使用催化剂，反应温度控制在1150–1315℃



(5-5)



(5-6)



(5-7)

5.2 氢气制备与纯化

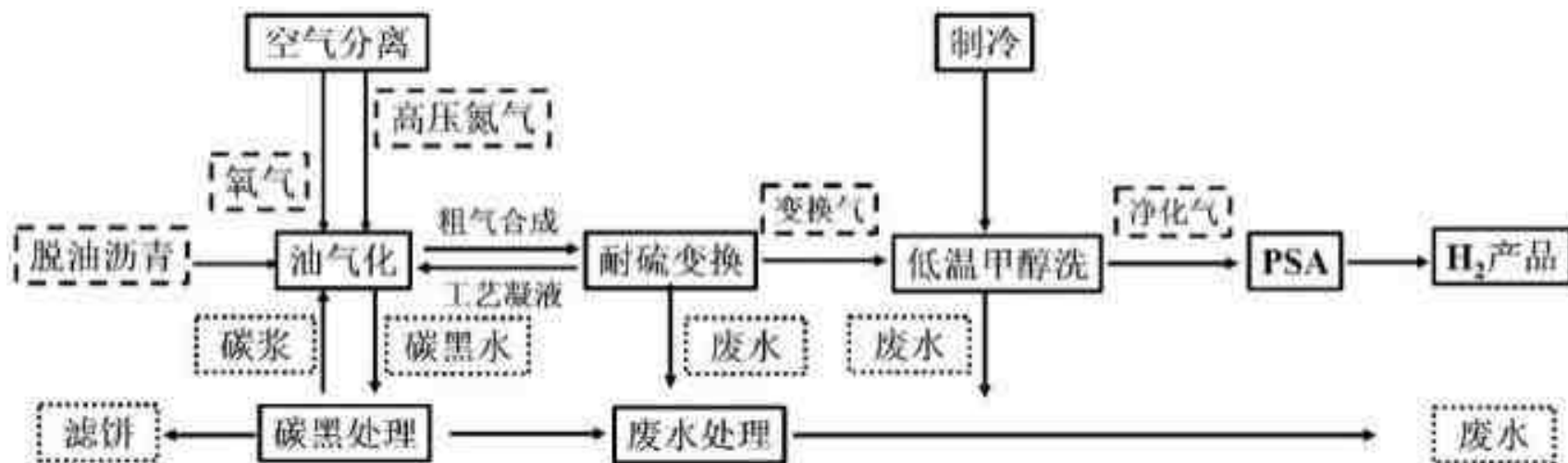
➤ 工艺流程

工艺流程主要有**油气化生成合成气**。得到以**CO**、**H₂**为主的合成气。

耐硫变换将**CO**变为**H₂**和**CO_m** 重油气化产生的合成气含有硫。

低温甲醇去杂。去除上述酸性气体。

PSA纯化。



5.2 氢气制备与纯化

◆ 电解水制氢

- 电解水制氢的原料为水和电能，产物没有任何温室气体的排放，且制备的氢气纯度较高，易与燃料电池联用，故电解水制氢有巨大的市场潜力及应用前景。
- 根据系统组成结构，电解水制氢可以分为酸/碱溶液电解制氢、质子交换膜（PEM）水电解制氢、高温固体氧化物（SOEC）水电解制氢三类。

表5-3 三种电解水制氢方法的比较

电解类型	酸/碱性电解	PEM电解	SOEC电解
电解质	H ₂ SO ₄ /KOH 水溶液	质子交换膜	固体氧化物电 解质
电流密度(A/cm ²)	<0.8	1-4	0.2-0.4
工作温度℃	≤90	≤80	≥800
操作压力kPa	100-3000	100-30000	——
氢气纯度%	≥99.8	≥99.99	——
能耗(kWh/Nm ₃)	4.5-5.5	4.0-5.0	——
系统寿命h	>100000	>40000	——
技术成熟度	充分产业化	初步商业化	初期示范

5.2 氢气制备与纯化

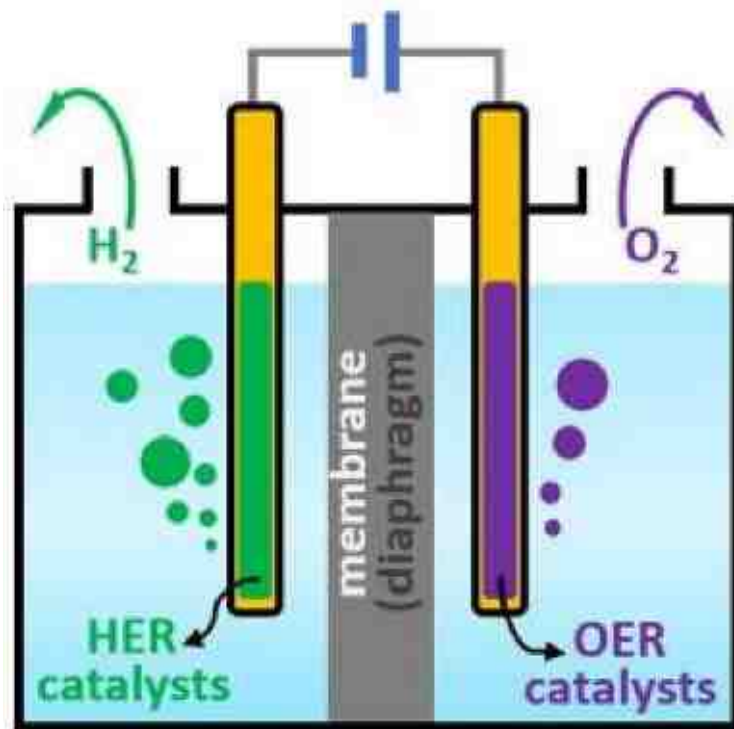
(1) 电解水制氢的基本原理

➤ 酸/碱溶液电解制氢

酸/碱溶液电解制氢的装置如图所示，一个**电解池**主要包括四个部分：**阳极**、**阴极**、**电解液**、**隔膜**。

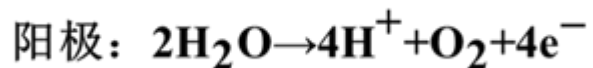
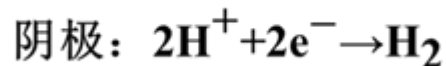
阳极和阴极的表面分别负载**析氧和析氢的催化剂**来加速水的分解。

当在阴阳两极表面施加外部电压时，水分子就会分解生成氧化反应和水的还原反应。

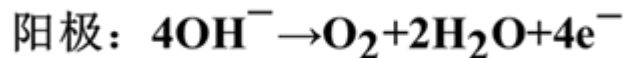
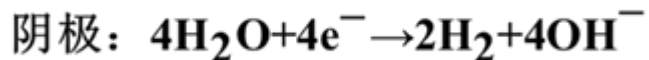


5.2 氢气制备与纯化

酸性水电解制氢体系



碱性水电解制氢体系



酸性电解质易腐蚀电解槽，且需使用质子交换膜，目前工业中不常用该体系。

碱性电解水制氢技术较为成熟，优点是使用寿命长，不足有工作电流较小、需要进行压力平衡的设计、使用便捷性有待提高。

5.2 氢气制备与纯化

➤ 质子交换膜（PEM）水电解制氢

水从**阳极区通入**电解槽并氧化成为 O_2 ，质子则以**水合质子**的形式通过电解槽中间的**质子交换膜**，随后在**阴极处还原成为 H_2** 。

PEM电解制氢技术具有以下特点：

膜既传导离子质，又能隔离气体；

膜有单向导通作用，避免了串气；

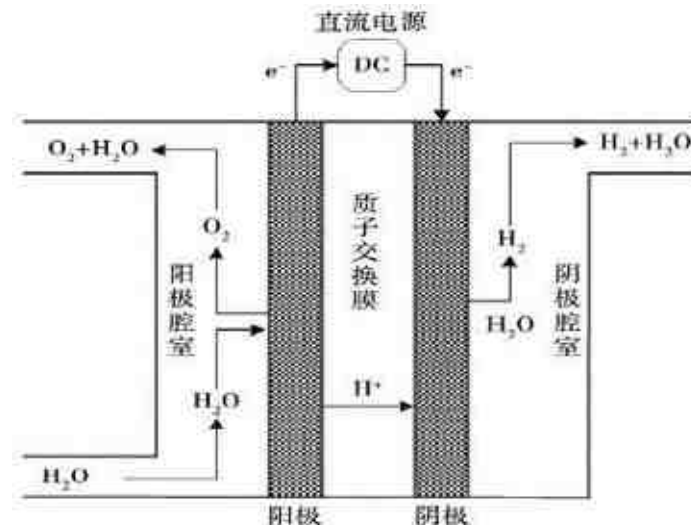
气体产物纯度高；

电极间距减小，减小了电解槽的尺寸；

工作电压和能耗低；

省去冷却系统，装置的体积和重量小；

纯水作为电解液，避免腐蚀。

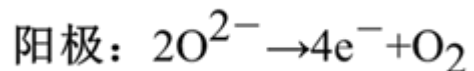
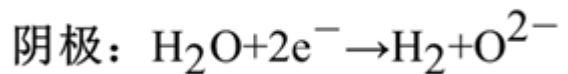


PEM目前的问题主要在于**成本高**。由于其阳极和阴极使用贵金属催化剂，且**质子交换膜**也较为昂贵。

5.2 氢气制备与纯化

➤ 高温固体氧化物（SOEC）水电解制氢

阴极和阳极的半电池反应分别为



SOEC电解具有理论优势：高的工作温度能显著降低阴极和阳极的过电位，减少电解过程中的能量损失；电解质的离子电导率随温度的升高而增加。

SOEC使用的固体电解质通常为 Y_2O_3 、 ZrO_3 。但由于技术成熟度还不高，**SOEC**目前仅处于初期示范阶段。

5.2 氢气制备与纯化

◆ 新型制氢技术

(1) 生物质制氢

- 生物质发酵制氢的基本原理 蓝绿藻产氢:

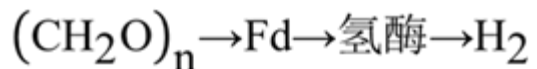
在光照、厌氧条件下通过光合作用分解水产生氢气和氧气。在这一光合系统中，**包含两个光合作用中心**：

光合作用中心PSII：接收太阳光分解水产生 H^+ 、电子和 O_2 。

光合作用中心PSI：产生还原剂用来固定 CO_2 。

光解有机物产氢：

缺少藻类中起光解水作用的**PSII**，因此进行不产氧光合作用



5.2 氢气制备与纯化

发酵细菌产氢:

在黑暗、厌氧条件下分解有机物产生氢气。

途径一：甲酸氢解酶系统催化。

途径二：NADH的再氧化产氢。

➤ 生物质化工热裂解制氢的基本原理

在无氧或低氧环境下，生物质被加热升温引起分子分解的过程。反应可归纳为：

生物质 → 炭 + 液体(含焦油) + 气体

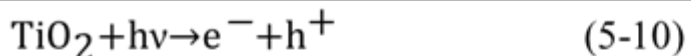
5.2 氢气制备与纯化

(2) 光催化制氢

光催化技术是指在光催化剂的作用下，**利用光子的能量进行化学反应的技术**。利用光催化技术分解水制氢是将低密度太阳能转化为高 密度化学能的过程。

- 光催化制氢的基本原理
反应原理（以**TiO₂**为例）

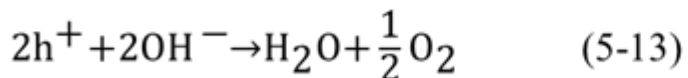
光催化剂



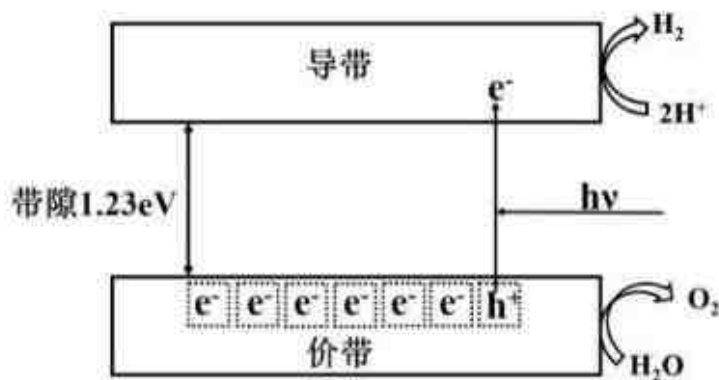
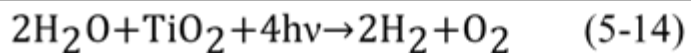
水分子解离



氧化还原反应



总反应



5.2 氢气制备与纯化

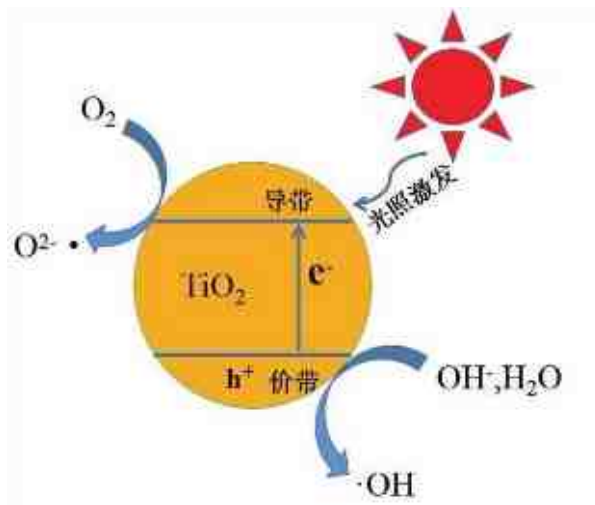
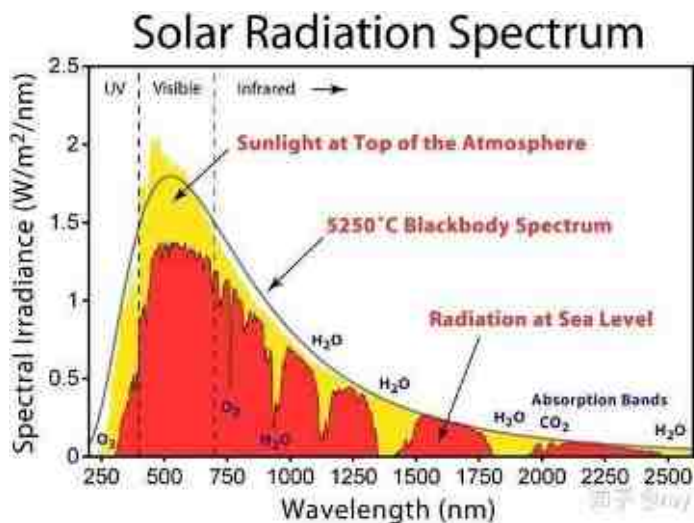
➤ 光催化制氢材料

光波长足够小时，光子具有的能量较高，可以直接分解水。若要实现到达地球表面的太阳光制氢，需要借助半导体光催化材料。

适合作为光解水催化剂的半导体材料需要具备以下条件：

半导体禁带宽度需大于水分解的最小带隙（约1.23 eV）；

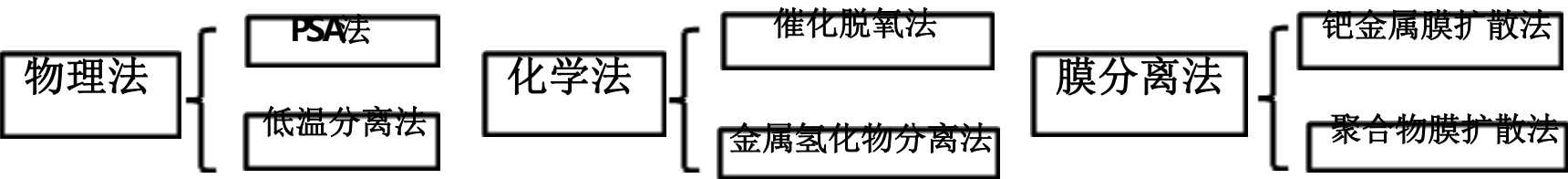
半导体材料的导带电位比氢电极电位稍负一些，同时价带电位则比氧电极电位稍正一些。



5.2 氢气制备与纯化

□ 氢气纯化原理

氢气纯化技术可以分为物理法、化学法、膜分离法三大类



技术	原理	原料气	纯度%	回收率%	生产规模	技术缺点
变压吸附法	固体材料对气体混合物的选择性吸附	任何富氢气	99.9999	70-85	大	吹扫过程有氢气损失，影响回收率
低温分离法	随着温度降低，沸点不同的气体冷凝顺序不同	石化废气	90-98	95	大	必须进行预处理去除CO ₂ 、H ₂ S和H ₂ O
催化脱氧法	杂质气体与氢气在催化条件下反应	氢氧气体	99.999	99	小-大	多用于电解水纯化，催化剂易失效
金属氢化物分离法	氢与金属反应生成氢化物	纯氢	99.9999	75-95	中小	回收材料易失效
金属膜扩散法	氢选择性扩散穿过金属膜	任何含氢气	99.9999	99	小-中	含硫化物及不饱和烃会降低渗透效率
聚合物膜扩散法	不同气体通过薄膜的扩散系数不同	氨吹扫气	92-98	85	小-大	He、CO ₂ 和H ₂ O也可能透

5.2 氢气制备与纯化

◆ 变压吸附法的原理及特点

(1) 基本原理

固体材料对于气体具有选择吸附性，且吸附量随压力的变化而改变。

(2) 基本过程

在较高压力下，气体中易被吸附的组分被吸附在吸附剂上，而不易被吸附的组分则从流气床口流出；

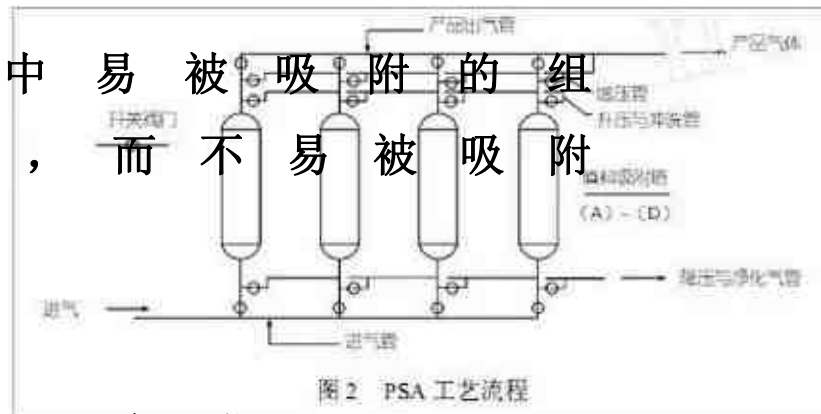
通过抽真空等方法使吸附剂解吸再生；

加压，使吸附剂达到吸附压力，以便进行下一次吸附。

(3) 特点

工艺流程简单、能耗低、产品纯度高、耐久性好、装置可靠性高。

产品回收率过低，一般只有**75%**左右。



5.2 氢气制备与纯化

◆ 低温分离法的原理及特点

(1) 基本原理

在恒压下逐步降低混合气体的温度，随着温度的降低，沸点高的杂质气体会先冷凝，而由于氢气的沸点较低，不会先冷凝，从而实现分离。

(2) 基本过程

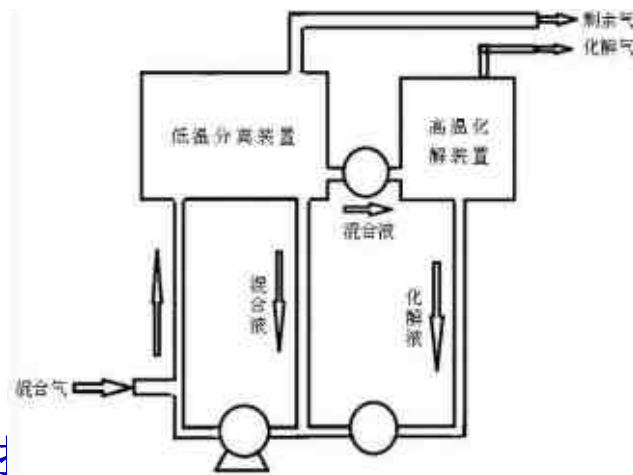
首先除去混合气体中 CO 、 HS_2 、 HO_2 等杂质；

随后降温。

(3) 特点

氢气的回收率较高。

工艺流程需要使用气体压缩机及冷却设备，导致



5.2 氢气制备与纯化

◆ 催化脱氧法的原理及特点

(1) 基本原理

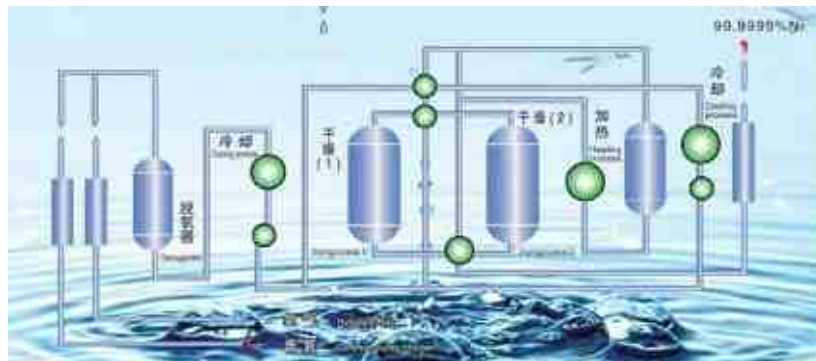
在有催化剂的条件下， H_2 与杂质气体发生化学反应来实现提纯。

(2) 分类

采用贵金属催化剂，利用 H_2 和 O_2 反应

首先生成水，随后使用分子筛吸水。

采用 Cu 、 Ni 、 Ag 等金属作为还原剂，再利用金属的氧化还原反应去除氧。



(3) 特点

纯化原理及操作简单、设备成本也相对较低。

去除杂质气体会产生 H_2O 和 CO_2 ，导致化学反应催化剂易失活。

5.2 氢气制备与纯化

◆ 金属氢化物分离法的原理及特点

(1) 基本原理

储氢合金在降温升压时可以吸收氢，而在升温减压时可以释放氢。因此储氢合金也可以被用来纯化氢气。

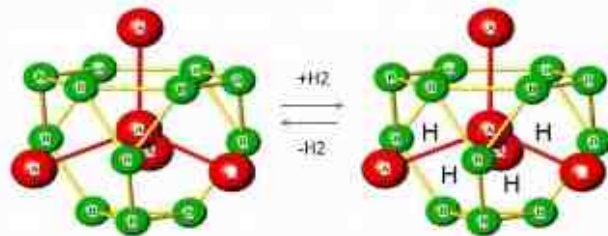
(2) 基本过程

催化剂的作用下，氢分子首先分解称为氢原子；
氢原子扩散到合金晶格内的间隙中；
当对合金进行加热时，氢原子被晶格释放后结合成为氢气分子，且纯度可达99.9999%。

(3) 特点

氢纯度高、操作简单、能耗低。

纯化材料失活，氢处理量较小，提纯能耗较高。



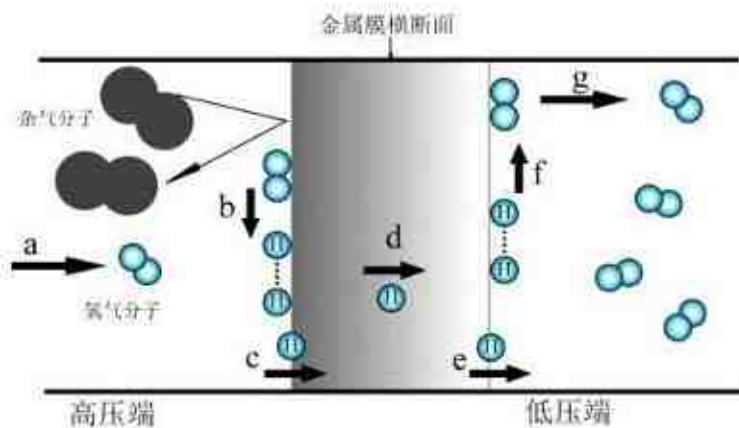
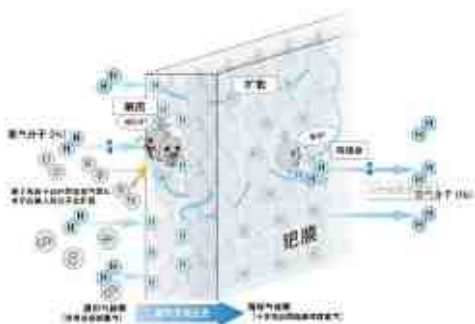
AB₂ 充放氢的结构示意图

5.2 氢气制备与纯化

◆ 金属膜扩散法的原理及特点

(1) 基本原理

一定温度下，钯几乎阻挡了其他所有气体，**只允许氢气通过**。



(2) 特点

产出氢气纯度高、氢气回收率高、几乎没有氢气损耗、钯合金膜抗杂质气体的**毒化能力强**；

生产成本低，同时其透氢速率过低，导致产量小，因此限制了其大规模工业应用。

5.2 氢气制备与纯化

◆ 聚合物膜扩散法的原理及特点

(1) 基本原理

一定压力下，不同气体通过聚合物膜的扩散速率不同，从而实现分离氢气。

(2) 发展历程

1965年，杜邦公司使用聚合物膜；

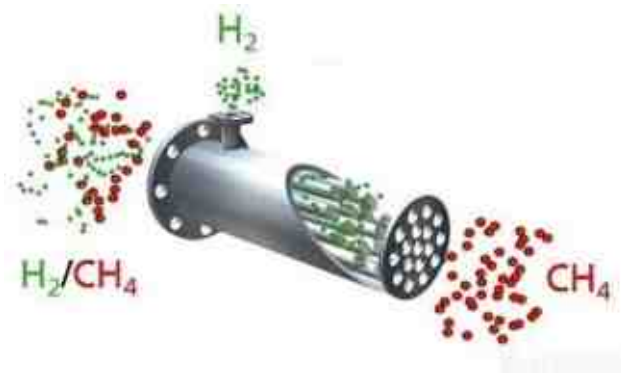
1979年，孟山都公司研制出中空纤维膜分离器；

(3) 特点

操作简单、适用范围较为广、氢气回收率较高；

回收压力较低；

一般可以与变压吸附法或低温分离法联合使用，从而产生最好的效果。



5.3 氢气储存

➤ 氢相图

氢的三相共存温度为**13.803K**，在**1bar**的压强下，**氢的沸点为20K**，因此，在常温常压下，氢为气态。

➤ 氢储存的特点

氢的密度为0.089 kg/m³，而储存能量含量与汽油相当的氢气，所需容积为汽油的**3000倍**。

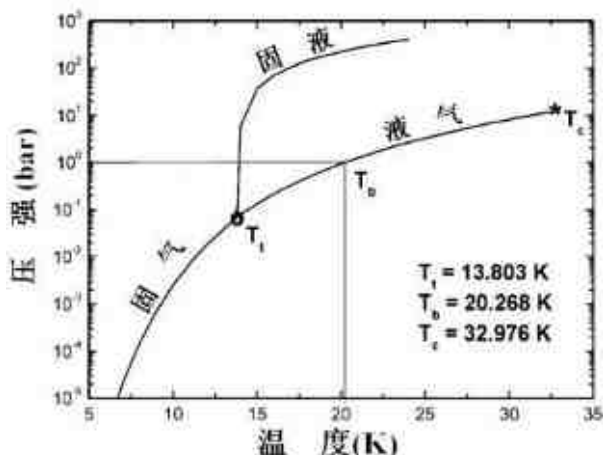
通过**增加氢的密度进一步减小氢的储存体积**是增加其储存效率的重要手段。

➤ 增加氢密度的本质

减小氢分子间的键合作用从而减小分子间斥力，可实现氢密度的增加。

➤ 氢储存的分类

高压气态储氢、低温液态储氢和固态储氢



5.3 氢气储存

□ 高压气态储氢原理

◆ 氢气高压存储原理

(1) 理想气体状态方程

$$pV = nRT \quad (5-17)$$

(2) 理想气体状态方程的修正

$$p = \frac{nRT}{V - nb} - \frac{an^2}{V^2} \quad (5-18)$$

$$Z = \frac{pV}{nRT} \quad (5-19)$$

(3) 简化的氢气状态方程

$$Z = \frac{pV}{RT} = \frac{1 + \alpha p}{T} \quad (5-20)$$

5.3 氢气储存

◆ 高压氢气的储存容器

高压储氢容器技术的发展先后经历了金属储氢容器、金属内衬环向缠绕复合储氢容器、金属内衬环向加纵向缠绕复合储氢容器、螺旋缠绕容器以及全复合塑料内衬储氢容器等阶段。

(1) 金属储氢容器

➤ 基本要求

抗氢脆

➤ 常用材料

奥氏体不锈钢、铜、铝

➤ 特点

有易加工、成本低的优点。

单位质量储氢密度比较低。



5.3 氢气储存

(2) 纤维缠绕金属内衬复合材料高压储氢容器

➤ 基本结构

内衬是金属材料，内衬外部被纤维材料缠绕，固化后形成复合增强结构。

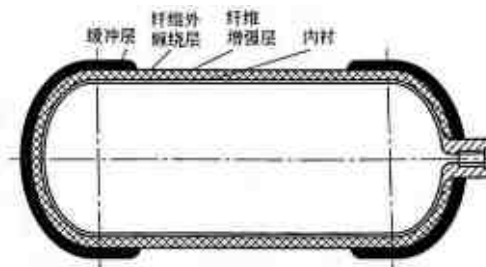
在容器的最外侧具有缓冲层，缓冲层避免了容器容器功能和形态损伤。

➤ 基本要求

金属材料需要有较强的抗氢渗透能力和抗疲劳能力，纤维材料主要起承受外载荷的作用，故可使用不同的纤维缠绕方式提高承载能力。

➤ 常用材料

金属内衬多使用铝合金材料，缠绕层的纤维材料有碳纤维、芳纶纤维、玻璃纤维。



5.3 氢气储存

(3) 全复合塑料储氢容器

➤ 设计初衷



为了减轻储氢容器的自重，提高单位质量储氢密度，同时降低成本。

(4) 金属内衬和塑料内衬复合材料高压储氢容器的比较

	铝内衬	塑料内衬
优势	(1) 结构无缝隙可防止渗透。 (2)在很大的温度范围内都稳定，可耐气体泄压时的高温降。 (3) 抗损伤能力强。	(1) 成本比金属内衬低。 (2) 高压循环寿命长。 (3) 塑料内衬较金属内衬的耐腐蚀性好。
劣势	(1) 铝内衬成本较高。 (2) 研发新规格内衬的周期过长。	(1) 接头处易发生氢气泄漏。 (2) 抗外力能力较金属内衬低。 (3) 有气体渗透的可能性。 (4) 内衬与复合材料黏结不牢，容易脱落。 (5) 塑料内衬对温度敏感。 (6) 塑料内衬刚度低。

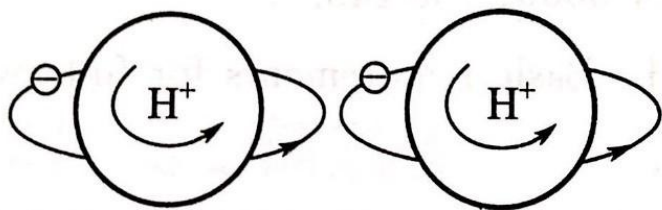
5.3 氢气储存

□ 低温液态储氢原理

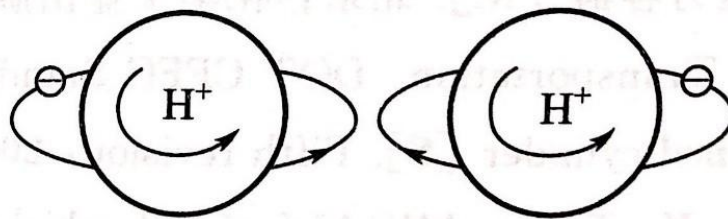
◆ 氢气液化的原理

(1) 正-仲氢转化

- 正氢向仲氢的转变是一个放热过程，其放出的热量和所处环境温度有关，一般来说，所处的环境温度越低，其转化反应放出的热量越多。
- 正氢向仲氢转化所放出的热量大于液氢的蒸发潜热。因此，在氢气液化的过程中，人们希望增加正氢向仲氢转化的速度及数目，尽快使液氢中的正氢分子达到最少。



(a) 正氢



(b) 仲氢

5.3 氢气储存

(2) Joule-Thomson效应和Joule-Thomson系数

➤ Joule-Thomson效应

在等焓条件下，当高压气流被强制通过一个多孔塞、狭缝或者小管口后，由于气体体积膨胀后压力减小，因此产生气体温度变化的现象。



当气体通过节流阀后，温度可能升高也可能降低。在常温常压下，大多数气体通过节流阀后温度会下降，称为制冷效应；但是在常温常压下氢、氦等少数气体经节流膨胀后温度反而升高，产生致热效应。因此，在常温常压下不能利用Joule-Thomson效应对氢气进行冷却液化。

5.3 氢气储存

➤ Joule-Thomson系数(μ)

等焓条件下温度随压力的变化率

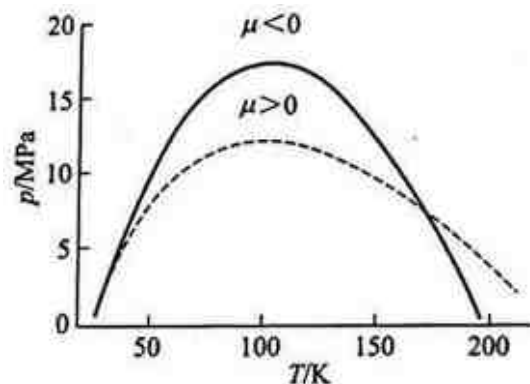
表达式

$$\mu = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_H$$

(5-22)

(3) Joule-Thomson转化曲线和转化温度

温度转化曲线上实线及虚线上各点的 Joule-Thomson 系数 $\mu=0$ 。根据节流膨胀的原理，膨胀后的压力总是减小的，即 $\Delta p < 0$ ，**若想通过节流膨胀使氢气降温 (即 $\Delta T < 0$)，需要在 Joule-Thomson 系数 $\mu > 0$ 的区间内实现。** 曲线内部是 $\mu > 0$ 的区域，故在该区域内可以实现节流制冷。



5.3 氢气储存

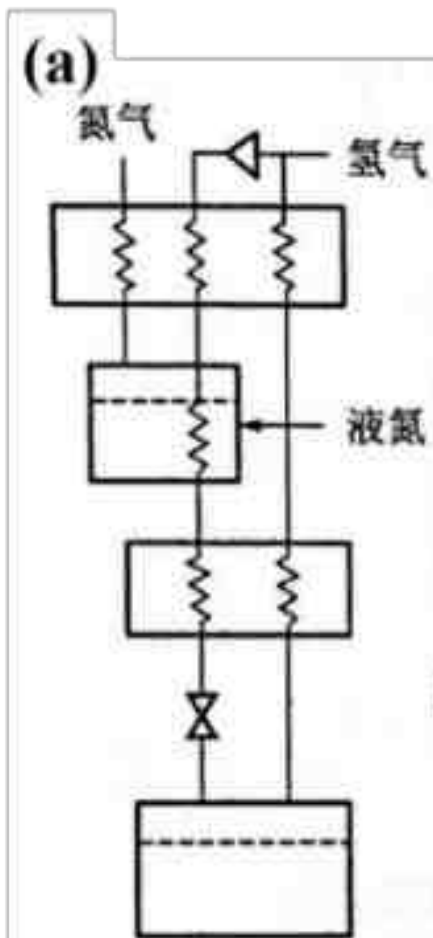
(4) 氢气液化的方法

➤ 林德法

该系统依赖Joule-Thomson效应进行液化，通常需要先

将氢气压缩。同时为了使氢气进行Joule-Thomson膨胀时能够降温，需要将初始温度降到氢气转变温度(1bar, 200K)以下。因此，林德法使用液氮(温度约为77K)作为冷源。

林德法装置简单，但效率较低。

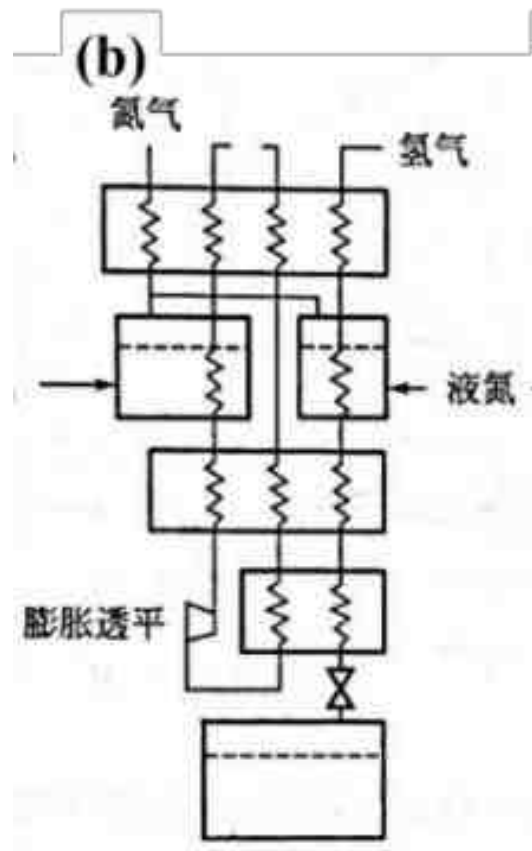


5.3 氢气储存

➤ 氮气布雷顿法

压缩氮气首先经过液氮预冷后进行膨胀透平，氮气透平后产生了大量冷量，该冷源在换热器中用于对氢气进行降温。而氢气首先经过液氮的预冷却，随后进入换热器中获取氮气透平的冷源而进一步冷却。此时氢气温度已经足够低，再进行Joule-Thomson膨胀进行液化。

氮主要用作制冷剂，液氮预冷用于减少压缩机的工作量。



5.3 氢气储存

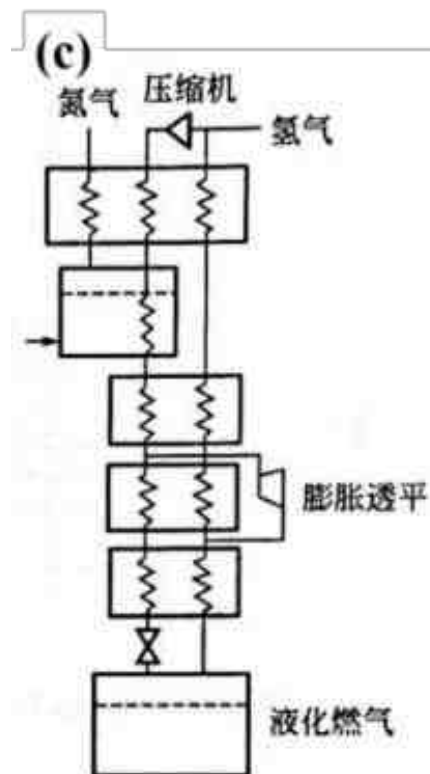
➤ 克劳德法

氢气被压缩后经液氮预冷，随后进入热交换器，在热交换器之间具有透平膨胀机，一部分氢气经过膨胀透平后，产生很大的冷量，该冷量用于冷却其他氢气。当氢气的温度足够低时，进行Joule-Thomson膨胀液化。

在此工艺中，液氮用于预冷，可提高液化率。

一般不用透平膨胀机进行冷凝，因为液化物质可能会损坏透平膨胀机的叶片。

克劳德法经济性好。氢本身是制冷剂，故其在循环过程中保有量大。目前大规模生产液氢常用克劳德法。



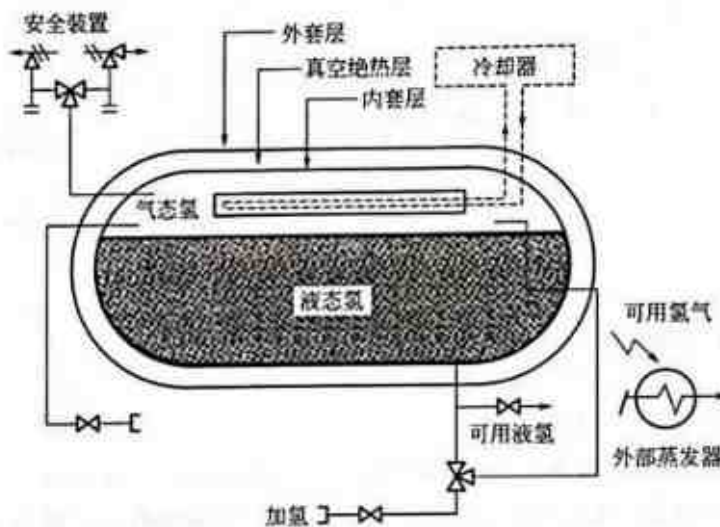
5.3 氢气储存

◆ 液氢存储技术

(1) 液氢储罐的结构设计

- 液氢蒸发损失量与储罐表面积和容积的比值(S/V)有关, S/V 越大, 则蒸发量越大。

形储罐的应力分布较为均匀, 因此可以有更高的机械强度, 但球形储罐的加工较为困难, 造价也比较高。目前常用圆柱形的液氢储罐。



5.3 氢气储存

➤ 例题

忽略容器的壁厚，试问同样容积的球形和立方体储罐，哪种储罐的蒸发损失量小。若对于绝热真空球形储罐来说，当容积为**50m³**时，蒸发损失为**0.4%** 试求容积为**1000 m³**和**19000 m³**时，蒸发损失约为多少。

解：设球形储罐的半径为**r**，立方体储罐的边长为**a**，根据题意

$$\frac{4}{3}\pi r^3 = a^3 = V$$

球形储罐的蒸发量**A1**

$$A1 = k \frac{4\pi r^2}{V}$$

立方体储罐的蒸发量**A2**

$$A2 = k \frac{6a^2}{V}$$

则：

$$\frac{A1}{A2} = \frac{2\pi r^2}{3a^2} < 1 \quad \text{因此，球形储罐的蒸发损失量小。}$$

由于蒸发损失量与容器表面积和容积的比值(**S/V**)成正比，容积为**1000**和 **19000 m³**时，蒸发损失大约为**0.15%**和**0.055%**

5.3 氢气储存

(2) 液氢设备的绝热技术

➤ 常规外绝热

将密度低、热导率小的材料覆盖在储罐表面达到绝热效果。

➤ 高真空绝热

通过在绝热夹层空间抽高真空，减少对流与传导换热。

➤ 真空粉末绝热

基本原理是在真空夹层中填充导热率小的材料，以减少对流传热。

➤ 高真空多层绝热

在真空夹层中填充导热率小的材料，以减少对流传热。

➤ 低温冷屏绝热

在真空夹层中设置冷屏。冷屏使用液氮或低温液体蒸发的冷蒸气进行冷却。

5.3 氢气储存

□ 固态储氢原理

◆ 物理吸附储氢

(1) 物理吸附储氢的基本原理

物理吸附基于吸附材料和氢分子之间弱的范德华力。

(2) 物理吸附储氢材料

➤ 碳材料储氢

- 活性炭吸附储氢

活性炭是一种具有高比表面积的非定形碳，内部丰富的孔隙结构使其具有良好的吸附能力。

此外，活性炭材料还具有化学性质稳定(耐酸碱、耐高温)、机械强度高、可再生使用的特点。



5.3 氢气储存

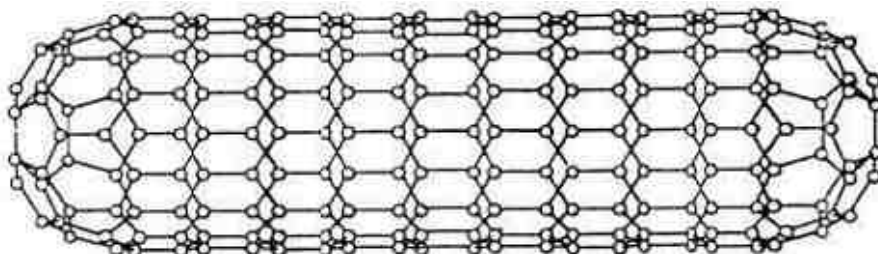
- 碳纤维吸附储氢

碳纤维的微观表面是分子级细孔，而内部是中空的，管直径大约为**10 nm**，比表面积很大，当**H**从碳纤维表面进入内部时可以在这些孔中凝聚，因此具有超级储氢能力。



- 碳纳米管吸附储氢

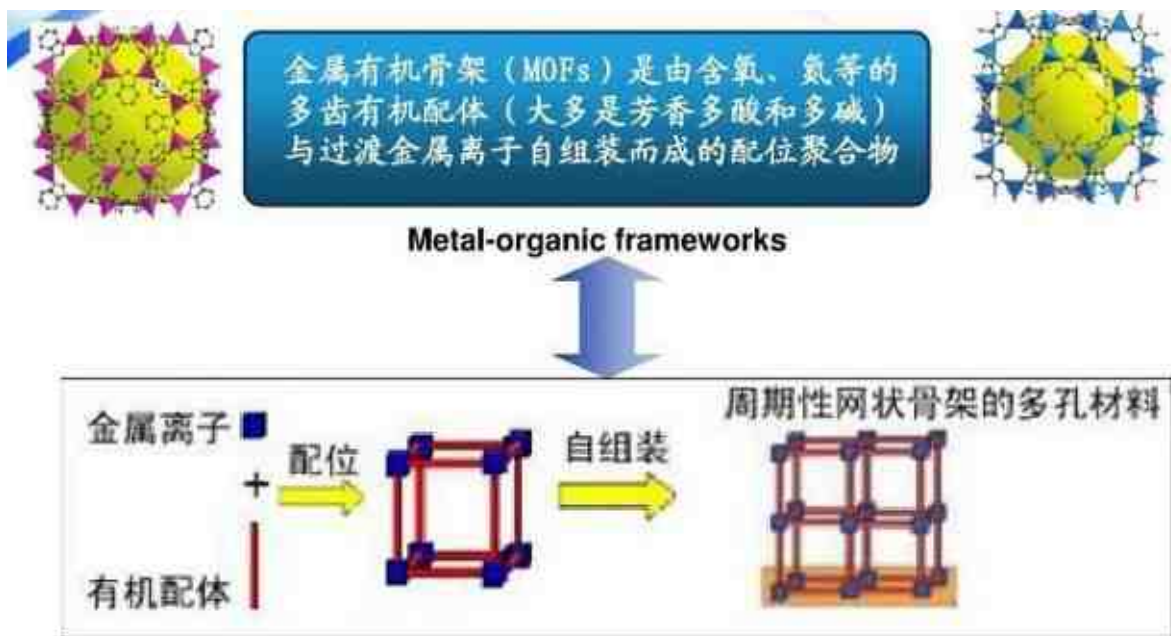
碳纳米管的直径一般为**2 – 20 nm**，由于碳纳米管的微观结构在一个维度方面较大，因此被视为是一种**一维纳米材料**。



5.3 氢气储存

➤ 金属-有机骨架材料储氢

金属有机骨架材料(MOFs)是一种微孔网络结构的配位聚合物，它由金属离子与含氧、氮等的多齿有机配体自组合形成。**MOFs材料的比表面积大、孔隙率高、孔结构可控、化学性质稳定，其具有固态储氢的潜力。**



5.3 氢气储存

◆ 化学吸附储氢

(1) 化学吸附储氢的基本原理

化学吸附储氢的过程为金属首先通过物理作用将氢分子吸附在表面，然后被吸附H原子逐个扩散进入金属晶胞中（通常进入晶胞的间隙位置），进入晶胞中的氢原子通过和金属原子键合形成固溶体或有序的氢化物结构，以此实现氢的储存。

(2) 化学吸附储氢材料

➤ 碳材料储氢

- 金属单质

金属镁储氢的吸氢过程极易发生，吸氢后形成稳定的化合物 MgH_2 ，并放

出大量的热；但是其缺点在于放氢温度高，放氢动力学差。

金属钛也可以与氢形成稳定化合物，该化合物为 TiH_2 ，是一种暗灰色粉末或结晶。

5.3 氢气储存

- 合金

储氢合金能够在一定的温度和压力条件下，吸收氢气生成金属氢化物，若将其加热，金属氢化物又能够分解，将氢气放出。

镁系 AB_2 型储氢合金的典型代表是 Mg_2Ni ，其理论储氢容量可达到3.6%

$TiFe$ 合金储氢材料的优点为：在室温下能可逆地吸放氢，且形成氢化物后仅

需几个大气压即可分解；但 $TiFe$ 合金需要活化后才能达到其最佳储氢效能，其活化较为困难。

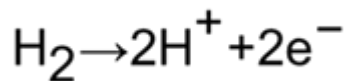
Zr 系 AB_2 二元合金中， A 原子和 B 原子的半径之比接近1.2，因而形成密堆排列的 $Laves$ 相结构，故该类合金也被称之为 AB_2 型 $Laves$ 相合金。在合金中 A 原子和 B 原子相间排列，其晶体结构具有很高的对称性及致密度。

5.4 氢储能应用

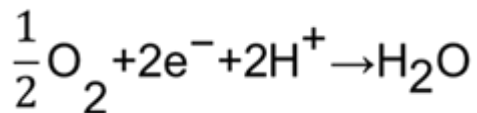
□ 燃料电池

◆ 基本反应

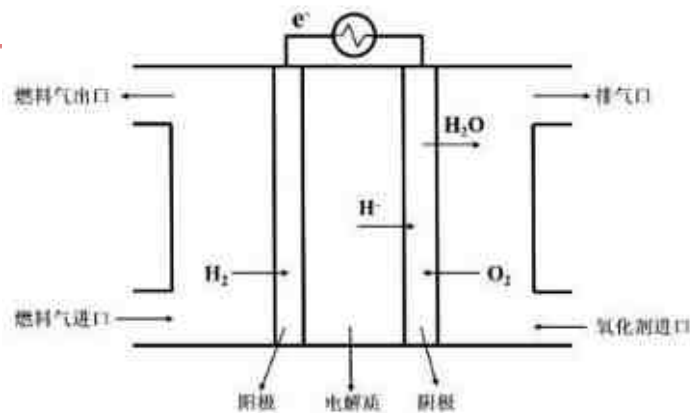
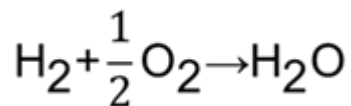
(1) 阳极：燃料 H 发生氧化反应，放出电子₂



(2) 阴极：电子和从穿过电解质的质子一起将 O 还原成水₂



(3) 总反应



(5-23)

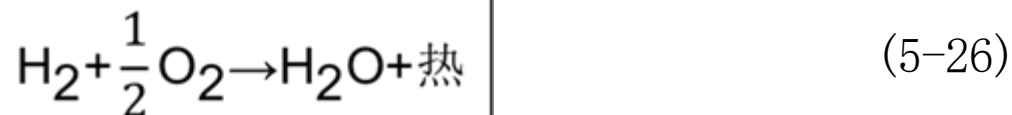
(5-24)

(5-25)

5.4 氢储能应用

◆ 反应热

(1) 放热反应:



(2) 反应热计算:

$$\Delta H = (H_f)_{\text{H}_2\text{O}} - (H_f)_{\text{H}_2} - \frac{1}{2}(H_f)_{\text{O}_2} \quad (5-27)$$

$$\Delta H = (H_f)_{\text{H}_2\text{O}} - (H_f)_{\text{H}_2} - \frac{1}{2}(H_f)_{\text{O}_2} = -286 \text{ kJ/mol} \quad (5-28)$$



(3) 反应熵

$$\Delta S = (S_f)_{\text{H}_2\text{O}} - (S_f)_{\text{H}_2} - \frac{1}{2}(S_f)_{\text{O}_2} \quad (5-30)$$

5.4 氢储能应用

◆ 理论电势

(1) 电功可以用电荷与电势表示:

$$W_{el} = qE \quad (5-31)$$

(2) 消耗**1mol**氢，转移的总电荷:

$$q = nN_{Avg}q_{el} \quad (5-32)$$

(3) 例题:

已知**25°C**时，**H₂O(l)**的标准摩尔生成焓和标准摩尔生成吉布斯函数分别为**-286kJ/mol**和**-237.3kJ/mol**。计算在氢-氧燃料电池中进行下列反应时，电池的电动势。

解：燃料电池中产生的最大电能对应于吉布斯自由能，

$$\text{H}_2(\text{g}, 100\text{kPa}) + \frac{1}{2} \text{O}_2(\text{g}, 100\text{kPa}) = \text{H}_2\text{O}(\text{l})$$

即 由式**(5-31)**可得，燃料电池的理论电势为

$$E = \frac{-\Delta G}{nN_{Avg}q_{el}} = \frac{237300 \text{ J/mol}}{2 \times 6.02 \times 10^{23} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ As/mol}} \approx 1.23 \text{ V}$$

5.4 氢储能应用

◆ 理论效率

(1) 能量转换效率的定义

输出能量与输入能量之比

(2) 燃料电池的最大可能效率

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{237.34}{286.02} = 83\% \quad (5-34)$$

上述燃料电池的能量转换效率是将氢的高热值作为输入能量计算得到的。
若以氢的低热值作为能量输入，燃料电池的效率将表示为。

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H_{LHV}} = \frac{228.74}{241.98} = 94.5\% \quad (5-35)$$

5.4 氢储能应用

◆ 工作温度

(1) 工作温度与电势

一般情况下，工作温度越高，燃料电池的电势越大。

(2) 常见燃料电池的工作温度

常见燃料电池的最佳工作温度在 80°C 左右，在该工作温度以上，可能会使燃料电池的性能下降。它甚至可以在低于 0°C 的条件下工作，只是该条件下不能达到其最大额定功率。

(3) 燃料电池热量的排出

为了使燃料电池在合适的温度条件下工作，需要将多余的热量排出系统。热量排出一般使用表面传导、对流耗散及外加循环系统冷却的方法。

5.4 氢储能应用

◆ 燃料电池的特点

(1) 效率高于热电装置

燃料电池是化学能直接转化为电能，**不受卡诺循环限制**，且在相对低的温度下也有更高的发电效率。

(2) 发电规模可调

发电规模可大可小，应用场景灵活，包括家用电源、非集中式发电等。

(3) 低排放或零排放

纯氢型燃料电池的排放仅为反应产物水及未参加反应的空气，**可以实现零排放**。

(4) 构成模块化

燃料电池的电池组由电池模块层组成，因此**可以通过改变层组数和模块数来满足不同的发电容量**。

(5) 工作无噪声

除鼓风机及泵外，**基本没有移动部件**，因此其振动及噪声较小。

5.4 氢储能应用

□ 典型应用案例

◆ 案例一

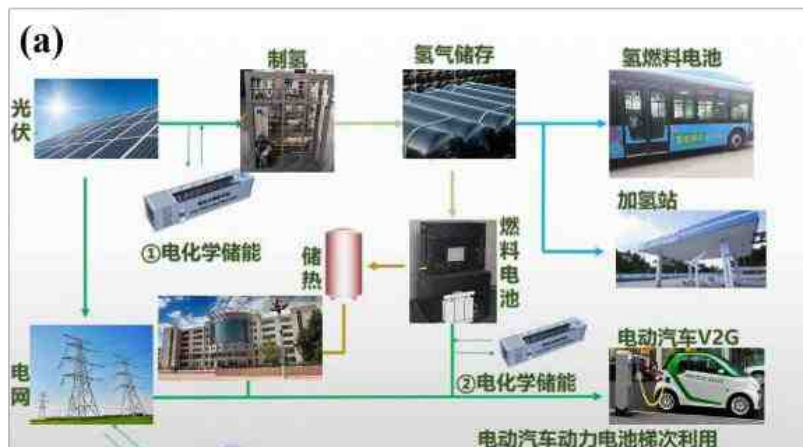
全球首款量产的氢燃料电池轿车**Mirai**与**Tesla**锂离子电池汽车**Model3**

	Mirai	Tesla Model 3
外观尺寸（长×宽×高） /mm	4890×1815×1535	4694×1850×1443
整备质量/kg	1850	1611
最高车速/(km/h)	175	225
0-100km/h加速时间/s	9.6	5.6
常规加氢（充电）时间 /min	3	>480
续航里程数/km	502	460
发动机功率/kW	114	175

5.4 氢储能应用

◆ 案例二

青海大学梅生伟教授团队在青海大学校内开展了**光伏电解水制氢-储氢-氢能综合利用的示范研究**。该示范系统实现了清洁能源的综合利用，即**系统的能量输入仅为太阳能和水**，输出包括冷、热、电、燃料，输出能量可以满足人居、交通的使用，且**整个过程没有任何污染及碳排放**。



总结与展望

- 氢能具有储量丰富，燃烧热值高，可存储，可转化形式广的优点。
- 氢气的制备可以分为化石能源重整制氢、电解水制氢、新型制氢技术三类。
- 化石能源重整制氢是目前制氢的主流技术，可分为煤气化制氢、天然气水蒸气重整制氢、重油制氢。
- 电解水制氢分为酸/碱溶液电解制氢、质子交换膜（PEM）水电解制氢、高温固体氧化物（SOEC）水电解制氢。
- 新型制氢技术包括生物制氢及光催化制氢两类。

总结与展望

- 氢能的中游储运方式可分为氢的**高压气态储运**、**低温液态储运**及**固态储运** 三类。
- 高压储运是先将氢气加压，随后装在高压容器中，使用交通工具进行输送，该储运方法在**技术上较为成熟**。
- 液氢的质量**储氢效率比高压气态储氢高**，适宜储存空间和质量有限的运载 场合，但液氢容易蒸发，**需在储运时做好绝热**。
- 固态储氢性能与材料息息相关，可以分为**物理吸附储氢**和**化学吸附储氢**。
- 氢能应用具有多转换性的特点，应用的主要方式有**直接燃烧**、通过**燃料电池**转化为电能和**化学反应**。

总结与展望

- 由于盐穴储氢具有低的渗透率，良好的蠕变，低垫气量等特点，是储氢的新途径之一。如中盐集团联合梅生伟教授团队在国内开展的盐穴储氢研究。
- 利用太阳能产生的电能用于电解水产生氢能、并将二氧化碳加氢转化为“绿色”甲醇等液体燃料。如中国科学院大连化物所的李灿院士团队提出的“液态阳光”概念，提供了一条可再生能源到绿色液体燃料生产的新途径。
- 对于氢能的综合利用，还可以全方位的考虑，如青海大学梅生伟教授团队提出在青海省龙羊峡水库开展光-水-氢-渔协同能源生态系统，将电解制氢过程中的副产品氧气应用于冷水鱼养殖中。

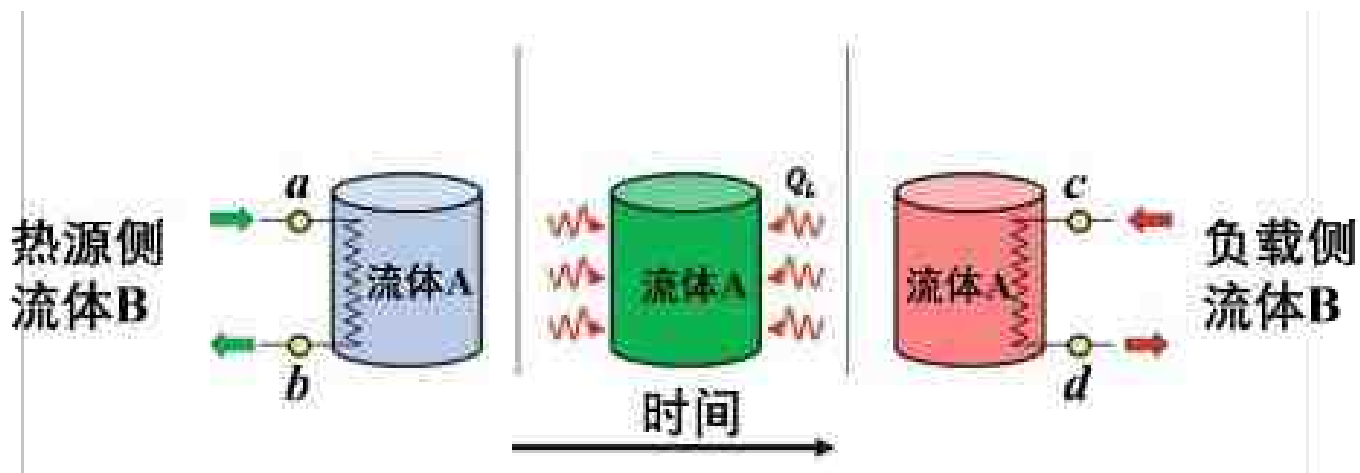
第六章 储热技术

- 储热技术概述
- 储热技术的理论基础
- 显热储热技术
- 潜热储热技术
- 热化学储热技术
- 储热技术的热力学评价方法
- 总结与展望

6.1 储热技术概述

□ 6.1.1 基本概念

储热技术是以储热材料为媒介将太阳能光热、地热、工业余热、低品位废热等热能加以储存并在需要时释放，力图解决由于时间、空间或强度上的热能供给与需求间不匹配所带来的问题，最大限度地提高整个系统的能源利用率而逐渐发展起来的一种技术。



典型储热系统的示意图

6.1 储热技术概述

□ 6.1.2 储热技术的分类

➤ 显热储热

储热介质的温度随着热能的储存和释放而升降且介质**不发生相变**

$$Q_S = mc_p\Delta T = V\rho c_p\Delta T$$

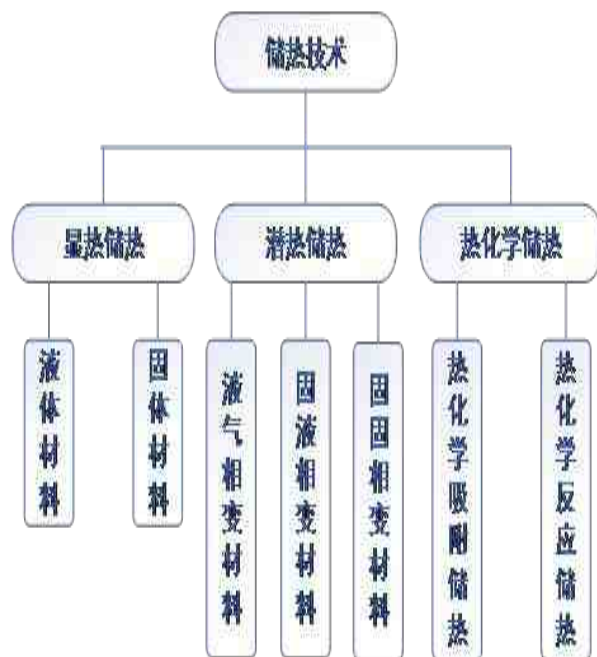
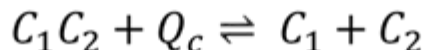
➤ 潜热储热

储热介质在经历热能的储存和释放时介质将**发生相变**

$$Q_L = m(c_{p,s}(T_{melt} - T_{initial}) + c_{p,l}(T_{final} - T_{melt}) + h_l)$$

➤ 热化学储热

利用可逆的**化学吸附**或**化学反应**进行热量的储存与释放



本章采用的储热技术分类方法

6.1 储热技术概述

例6-1：将**25°C**、**1 kg**水在标准大气压(**101kPa**)下定压加热到**150°C**，试问在此过程中水共经历了哪几种状态？一共吸收了多少热量？

解：根据水的物性表可查得水在标准大气压下的汽化温度为100°C，因此在题目给定的过程中，水共经历25°C~100°C的液态、100°C的饱和态以及100°C~150°C的气态这三种状态。同样由物性表可查出，25°C~100°C液态水以及100°C~150°C气态水的平均定压比热容分别为4.21 kJ/(kg·K)和2.03 kJ/(kg·K)，而水在相变过程中的潜热为2256.7 kJ/kg，根据式(6-2)，水吸收的总热量为

$$Q_L = 1 \times (4.21 \times (100 - 25) + 2.03 \times (150 - 100) + 2256.7) \text{ kJ} = 2673.95 \text{ kJ}$$

6.1 储热技术概述

6.1.2 储热技术的分类

三种储热技术对比

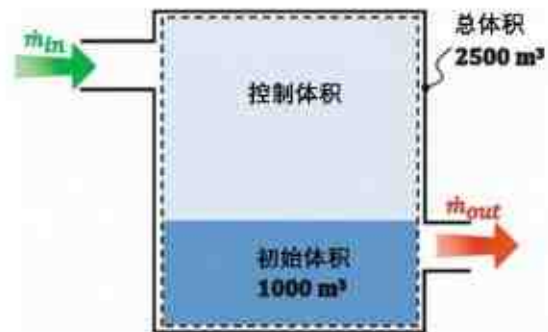
	显热储热	潜热储热	热化学储热
储热材料	水，导热油，碎石，鹅卵石，土壤等	有机材料、无机材料	碳酸盐、氨水、金属氢化物、金属氧化物等
优势	环境友好； 原材料价格低； 系统相对简单，易于控制； 可靠性佳	储热密度高于显热储热； 可提供恒温的热能	储能密度最高； 系统紧凑； 热损可忽略；
不足	储热密度低； 用于区域供热时占地空间大； 存在自放热以及热损现象； 投建成本高昂； 受限于地质条件	相变材料费用高昂； 热稳定性差； 材料会出现结晶现象； 材料会出现腐蚀现象	充放热过程较难控制； 循环稳定性差
技术成熟度	高，已用于大规模示范电站	中，处于实验室示范到商业示范过渡阶段	低，处于机理分析、结构测试和实验室验证阶段
未来研究重点	储热系统运行参数优化； 储热损失控制	新型相变材料开发； 相变材料换热特性改进	储放热过程控制； 储放热介质选择；

6.2 储热技术的理论基础

□ 6.2.1 热力学基础

➤ 质量平衡

$$\sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} = \frac{dm_{sys}}{dt}$$



例6-2示意图

- **例6-2：**如图所示为一个用于回收、储存建筑废水的储罐，罐体总容积为 **2500 m^3** 。假设储罐内废水的初始体积为 **1000 m^3** ，在泵的作用下，废水以 **$1.2 \text{ m}^3/\text{min}$** 的体积流量排入储罐，同时又以 **$0.5 \text{ m/s}$** 的流速从直径为 **$0.1 \text{ m}$** 的管道中排除，试求 **$24 \text{ h}$** 以后储罐内废水的容积(水的密度始终为 **$1000 \text{ kg/m}^3$**)。

解：令 $\dot{V}$ 表示体积流量，则将式(6-4)差分后可得

$$(\rho \dot{V})_{in} - (\rho \dot{V})_{out} = \frac{[(\rho V)_{final} - (\rho V)_{initial}]}{\Delta t}$$

由题目已知水的密度恒定，则上式可变为

$$\begin{aligned} V_{final} &= (\dot{V}_{in} - \dot{V}_{out})\Delta t + V_{initial} = \\ &\left[\left(\frac{1.2}{60} \right) - \left(0.5 \times \pi \frac{0.1^2}{4} \right) \right] \times (24 \times 3600) + 1000 = 2389 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

6.2 储热技术的理论基础

□ 6.2.1 热力学基础

➤ 能量平衡

● 闭口系

$$\frac{d}{dt}(U) + \frac{d}{dt}(KE) + \frac{d}{dt}(PE) = (\dot{W}_{in} - \dot{W}_{out}) + (\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out})$$

● 开口系

$$\begin{aligned} \frac{dE_{sys}}{dt} = & [\dot{W}_{in} - \dot{W}_{out}] + [\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out}] + \sum \left[\dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \right]_{in} \\ & - \sum \left[\dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \right]_{out} \end{aligned}$$

6.2 储热技术的理论基础

□ 6.2.1 热力学基础

- **例6-3：**如图所示为世界上最古老的储热设备之一，该设备由岩石或砖块堆积而成，在白天日照充足时，该设备被置于露天环境吸收和储存太阳能，在夜间，该设备通过释放白天储存的热量为室内供暖。假设该设备由岩石组成，岩石质量为**200 kg**，比热容为**2 kJ/(kg·K)**，在白天吸热时，由于热损不可忽视，该设备能够吸收**40%**的太阳能，太阳辐照 $I_{solar} = 450 \text{ W/m}^2$ ，有效辐照面积和辐照时间为别为**5 m²**和**8 h**，岩石起始温度为 $T_{initial} = 15^\circ\text{C}$ ，试求**8 h**太阳辐照后岩石的 T_{final} 。

解：由题可知，该储热设备在吸收太阳能的过程中动能、势能均无变化，利用关系式 $mcT = U$ ，基于式(6-4)得

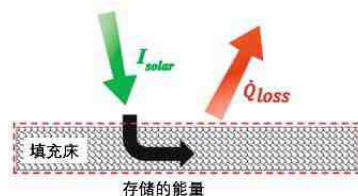
$$\frac{d}{dt}(mcT) = 0.4(I_{solar}A)$$

差分时间后可得：

$$mc(T_{final} - T_{initial}) = 0.4(I_{solar}A) \times (8 \times 3600)$$

最后可求得：

$$T_{final} = \frac{0.4 \times (450 \times 5)}{200 \times 2000} \times (8 \times 3600) + 15^\circ\text{C} = 79.8^\circ\text{C}$$



例6-3示意图

6.2 储热技术的理论基础

6.2.1 热力学基础

熵平衡

比熵变化

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v(T) \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$
$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) \frac{dT}{T} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$



$$s_2 - s_1 = c \ln \frac{T_2}{T_1}$$

不可压缩介质简化

$$s_2 - s_1 = \frac{h_{sf}}{T_{melting}}$$

融化相变

$$s_2 - s_1 = \frac{h_{fg}}{T_{boiling}}$$

沸腾相变

开口系

$$\frac{dS_{sys}}{dt} = \sum_i \frac{\dot{Q}_i}{T_{b,i}} + \sum (\dot{m}s)_{in} - \sum (\dot{m}s)_{out} + \dot{S}_{gen}$$

6.2 储热技术的理论基础

□ 6.2.1 热力学基础

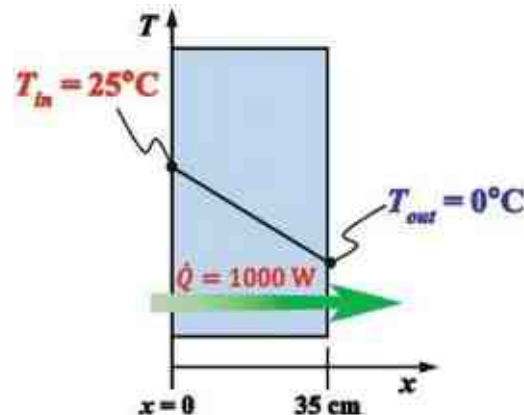
例6-4: 如图所示为一个宽3.5 m 高6 m 厚35 cm的墙, 在稳态条件下, 墙 的内、外壁面温度分别为25°C和0°C, 如果穿越墙壁的热功率为1000 W 求 此过程中的熵产。

解: 在稳态、无质熵流流进、流出墙体的情况下, 式(6-10)变为

$$0 = \left(\frac{\dot{Q}}{T_{in}} \right) - \left(\frac{\dot{Q}}{T_{out}} \right) + \dot{S}_{gen} = \left(\frac{1000}{298} \right) - \left(\frac{1000}{273} \right) + \dot{S}_{gen}$$

可解得

$$\dot{S}_{gen} = 0.307 \text{ W/K}$$



例6-4示意图

6.2 储热技术的理论基础

□ 6.2.1 热力学基础

➤ 熵平衡

● 开口系

$$\frac{dEx_{sys}}{dt} = \underbrace{\sum \dot{Ex}_{heat}}_{\text{与外界交换热量产生}} + \underbrace{\sum \dot{Ex}_{work}}_{\text{与外界交换功产生}} + \underbrace{\sum [\dot{m}ex_{flow}]_{in} - \sum [\dot{m}ex_{flow}]_{out}}_{\text{工质流进、流出产生的熵变化}} - \underbrace{\dot{Ex}_{dest}}_{\text{不可逆过程造成的熵损}}$$

$$Ex_{sys} = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) + \frac{1}{2}mV^2 + mgz$$

$$\dot{Ex}_{heat} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q}$$

$$\dot{Ex}_{work} = \dot{W}$$

$$ex_{flowin} = (h_{in} - h_0) - T_0(s_{in} - s_0) + \frac{1}{2}V_{in}^2 + gz_{in}$$

$$ex_{flow,out} = (h_{out} - h_0) - T_0(s_{out} - s_0) + \frac{1}{2}V_{out}^2 + gz_{out}$$

6.2 储热技术的理论基础

□ 6.2.1 热力学基础

- **例6-5：**如图所示为某种充热装置，该装置为多层结构，第一层由电加热后再将热量传递给其他层，假设该装置为两层结构，第一层和第二层温度分别为140°C和100°C，装置在运行时处于稳态且和外界环境绝热，电功率及传递的热功率均为1 kW，求第一层和第二层的熵损和整个装置的熵损。

解：由题意可知，该充热装置无工质进出，处于稳态，根据该设备的能量交换过程及式(6-12)-(6-17)，对于第一层结构，可列出熵平衡方程

$$0 = \dot{W}_{electric} - \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} - \dot{E}x_{dest,layer1} = 1000 - \left(1 - \frac{300}{413}\right) 1000 - \dot{E}x_{dest,layer1}$$

求得 $\dot{E}x_{dest,layer1} = 726.4 \text{ W}$ 。

对于第二层结构，可列出熵平衡方程

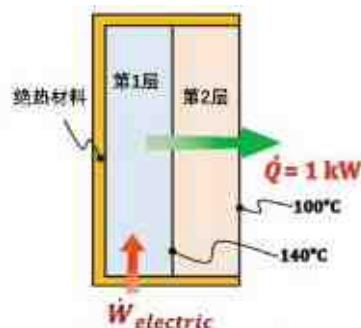
$$0 = \left(1 - \frac{300}{413}\right) 1000 - \left(1 - \frac{300}{373}\right) 1000 - \dot{E}x_{dest,layer2}$$

求得 $\dot{E}x_{dest,layer2} = 77.9 \text{ W}$ 。

对整个系统，可列出熵平衡方程

$$0 = 1000 - \left(1 - \frac{300}{373}\right) 1000 - \dot{E}x_{dest,system}$$

可求得 $\dot{E}x_{dest,system} = 804.3 \text{ W} = \dot{E}x_{dest,layer1} + \dot{E}x_{dest,layer2}$



例6-5示意图

6.2 储热技术的理论基础

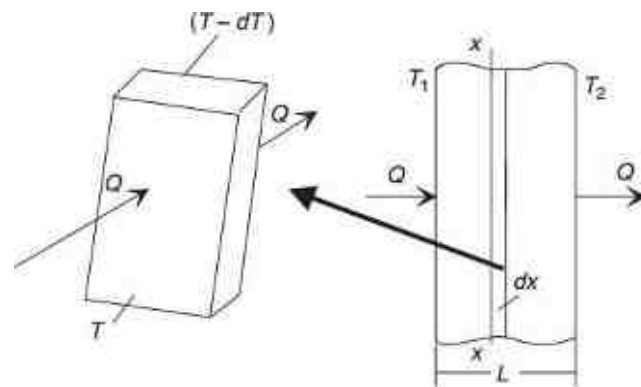
□ 6.2.2 传热学基础

➤ 热传导

某介质内发生热传导的宏观原因是温差的存在, 从微观角度看, 热传导是由于大量分子、原子或电子的互相撞击, 使能量从物体温度较高部分传至温度较低部分的过程。

傅里叶定律: 在均匀单一介质内, 传热速率正比于垂直于该截面方向上的温度变化率和截面面积, 而热量传递的方向则与温度升高的方向相反。

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx}$$
$$\dot{Q}_{cond,cylinder} = 2\pi k L_{cylinder} \frac{T_1 - T_2}{\ln r_2 / r_1}$$
$$\dot{Q}_{cond,sphere} = 4\pi k \frac{T_1 - T_2}{1/r_1 - 1/r_2}$$



平板热传导

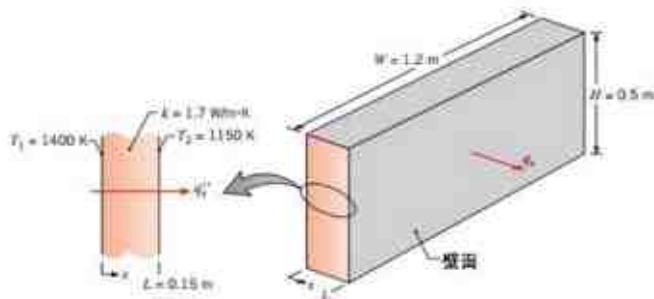
6.2 储热技术的理论基础

□ 6.2.2 传热学基础

- **例6-6：**如图所示，某个工业炉的壁面由厚度为0.15 m、导热率为1.7 W/(m·K)，在稳态条件下测得内外壁面温度分别为1400 K和1150 K，若壁面宽、高分别为1.2 m、0.5 m，求该壁面的热损失率。

解：根据式(6-2)及题目中所给条件，可求得壁面热损失率为

$$\dot{Q}_{cond} = 1.7 \times \frac{1.2 \times 0.5}{0.15} \times (1400 - 1150) \text{ W} = 1700 \text{ W}$$



例6-6示意图

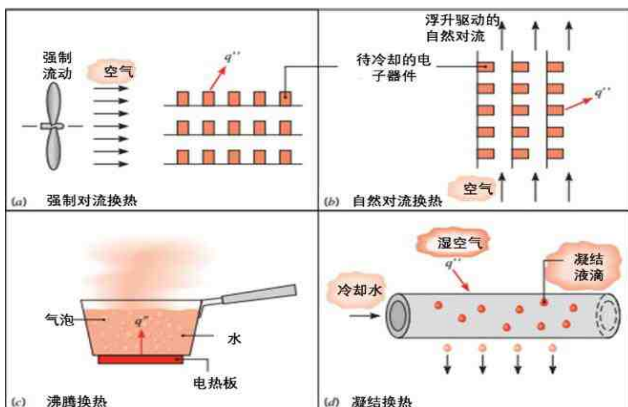
6.2 储热技术的理论基础

□ 6.2.2 传热学基础

➤ 热对流及对流换热

热对流是指由于流体的宏观运动，从而使流体各部分之间发生相对位移，冷热流体相互掺混所引起热量传递过程，热对流仅发生在流体中，由于流体内部本身也存在温差，因此热对流的同时必然伴有热传导

对流换热是指当一种流体流过某一固体壁面，且二者存在温差时，发生的传热过程。从微观看，对流换热是借分子随机运动(热传导)和边界层中流体的整体运动(热对流)维持的



流换热过程通常由**牛顿冷却公式**描述

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_w - T_f)$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_f - T_w)$$

6.2 储热技术的理论基础

□ 6.2.2 传热学基础

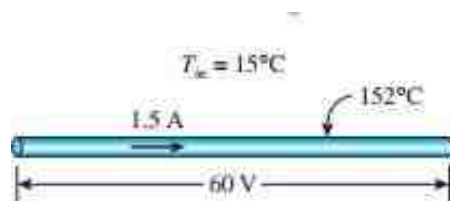
- **例6-7：**如图所示，一根长为2 m、直径为3 mm的导线处于温度为15°C的环境中，在稳态下，测得该导线的电流、电压、温度分别为1.5 A、60 V、152°C，假设导线由于电阻产生的热量仅通过对流换热的方式被散向环境，求导线与环境空气之间的对流换热系数。

解：在稳态下，导线的热损率等于导线的产热率，即

$$\dot{Q}_{conv} = VI = 60 \times 1.5 \text{ W} = 90 \text{ W}$$

在题目给定导线尺寸、温差的前提下，对流换热系数可由式(6-24)求得

$$h = \frac{\dot{Q}_{conv}}{A(T_w - T_f)} = \frac{90}{\pi \times 0.003 \times 2 \times (152 - 15)} = 34.9 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$



例6-7示意图

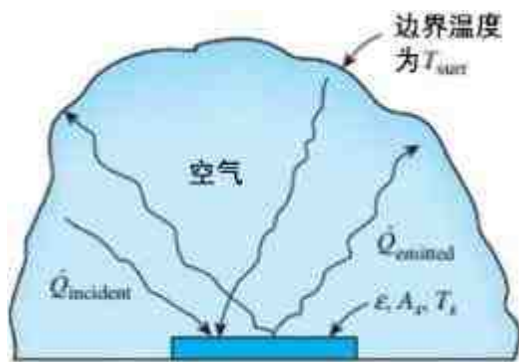
6.2 储热技术的理论基础

□ 6.2.2 传热学基础

➤ 热辐射

热辐射是指物体由于具有温度而辐射电磁波的现象。当物体发出的辐射能被另一物体接收时，总辐射能的一部分被吸收，一部分被反射，一部分穿透该物体后继续传播，我们将吸收、反射、穿透部分和总辐射能的比值分别称为**吸收率**、**反射率**和**穿透率**

物体热辐射的具体计算由**斯忒藩-玻尔兹曼**定律描述



物体与环境之间的辐射换热

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon_s \sigma A_s (T_s^4 - T_{surr}^4)$$

6.2 储热技术的理论基础

□ 6.2.2 传热学基础

- **例6-8：**假设某住宅中由天花板、底板以及墙壁所组成的内表面在夏季温度为25°C，在冬季为10°C，试求室内人体与环境之间在夏季和冬季的净辐射换热量(假设人外露表面积为1.4 m²、发射率为0.95、温度为30°C)。

解：由题目已知条件及式(6-27)可知，夏季和冬季的净辐射换热量分别为

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{rad,summer} &= \varepsilon_s \sigma A_s (T_s^4 - T_{surr,summer}^4) \\ &= 0.95 \times 5.669 \times 10^{-8} \times 1.4 \times (303^4 - 298^4) \text{ W} = 40.9 \text{ W}\end{aligned}$$

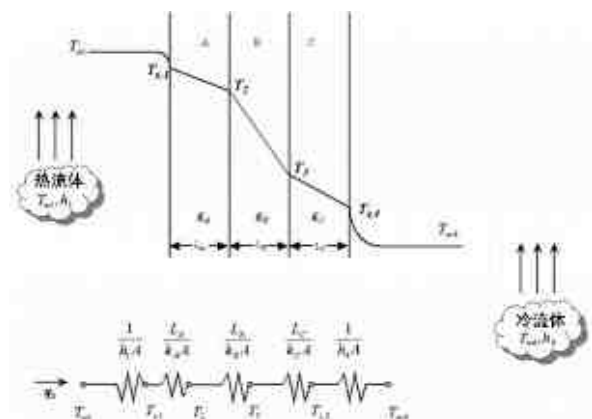
$$\begin{aligned}\dot{Q}_{rad,winter} &= \varepsilon_s \sigma A_s (T_s^4 - T_{surr,winter}^4) \\ &= 0.95 \times 5.669 \times 10^{-8} \times 1.4 \times (303^4 - 283^4) \text{ W} = 152 \text{ W}\end{aligned}$$

6.2 储热技术的理论基础

□ 6.2.2 传热学基础

➤ 热阻与总换热系数

如果将温差类比于电压，传热速率类比于电流，则可将电路中相应的研究方法应用于传热过程中以简化其计算和分析。



复合换热过程及其等效热网络

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{\left(\frac{1}{h_1 A}\right) + \left(\frac{L_A}{k_A A}\right) + \left(\frac{L_B}{k_B A}\right) + \left(\frac{L_C}{k_C A}\right) + \left(\frac{1}{h_2 A}\right)}$$

$$R = \left(\frac{1}{h_1 A}\right) + \left(\frac{L_A}{k_A A}\right) + \left(\frac{L_B}{k_B A}\right) + \left(\frac{L_C}{k_C A}\right) + \left(\frac{1}{h_2 A}\right)$$

$$U = \frac{1}{R}$$

6.3 显热储热技术

□ 6.3.1 显热储热材料及选择

➤ 液体材料

材料	T (°C)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/(kg·K))	k (W/(m·K))	$10^6 \times \alpha$ (m ² /s)	$10^{-3} \times \beta$ (J/(m ² ·K·s ^{1/2}))
水	20	998	4.183	0.598	0.142	1.58
硅油(AK250)	25	970	1.465	0.168	0.118	0.49
变压器油	60	842	2.09	0.122	0.069	0.46
熔盐K-NaNO ₃	230	1950	1.57	0.5	0.16	1.24
液态石蜡	20	900	2.13	0.26	0.14	0.71
钠	100	927	1.385	85.84	66.85	10.5

优势：既可以作为储热材料，也可以作为传热介质

6.3 显热储热技术

□ 6.3.1 显热储热材料及选择

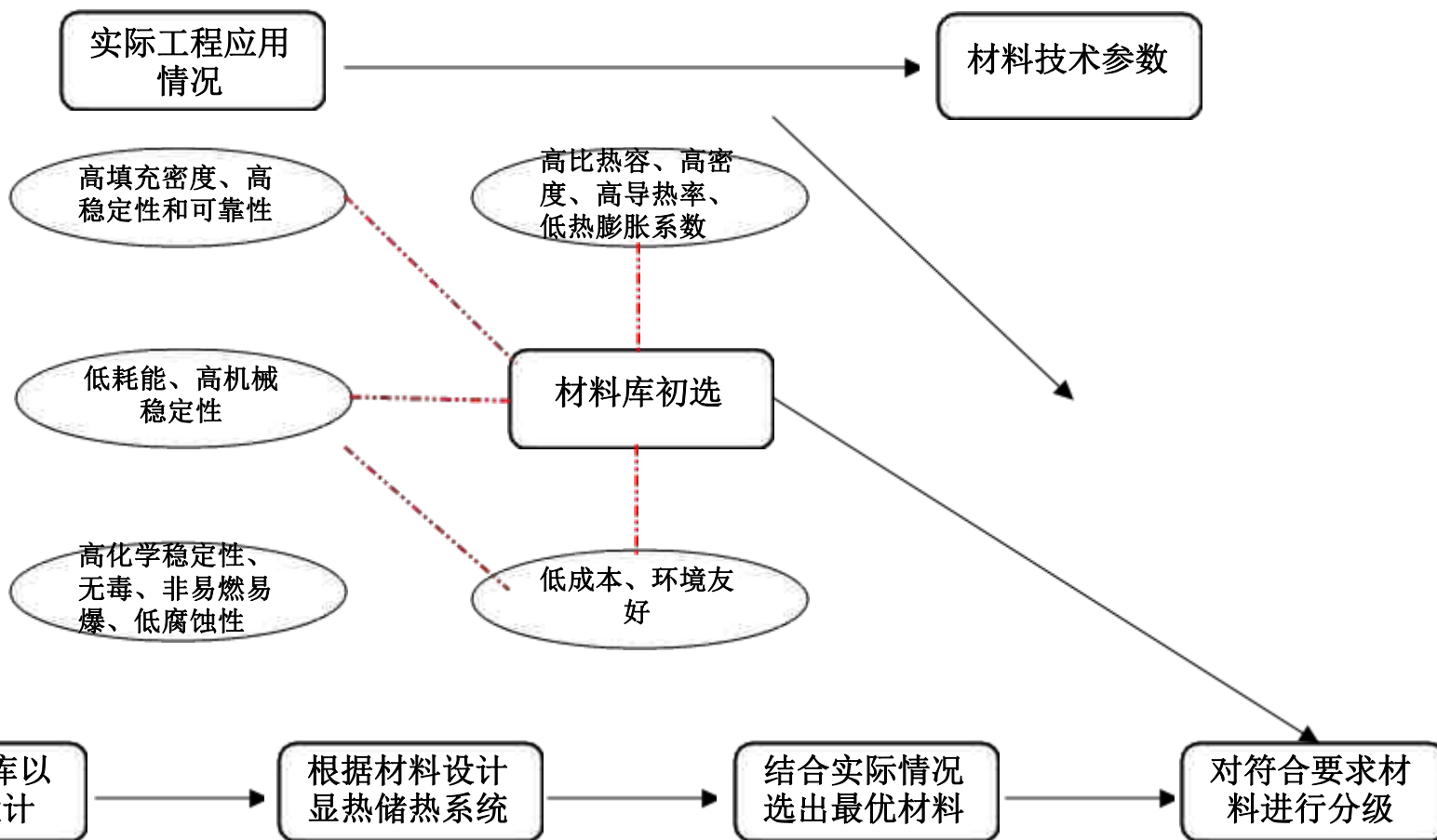
➤ 固体材料

材料	T (℃)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/(kg·K))	k (W/(m·K))	$10^6 \times \alpha$ (m ² /s)	$10^{-3} \times \beta$ (J/m ² Ks ^{1/2})
铝	20	2700	0.945	238.4	93.3	24.66
铜	20	8300	0.419	372	107	35.97
铁	20	7850	0.465	59.3	16.3	14.7
铅	20	11340	0.131	35.25	23.6	7.24
砖	20	1800	0.84	0.5	0.33	0.87
混凝土	20	2200	0.72	1.45	0.94	1.52
花岗岩	20	2750	0.89	2.9	1.18	2.67
石墨	20	2200	0.61	155	120	14.41
石灰岩	20	2500	0.74	2.2	1.19	2.02
砂岩	20	2200	0.71	1.8	1.15	1.68
炉渣	20	2700	0.84	0.57	0.25	1.13
氯化钠	20	2165	0.86	6.5	3.5	3.5
黏土	20	1450	0.88	1.28	1	1.28
砾质土	20	2040	1.84	0.59	0.16	1.49

6.3 显热储热技术

□ 6.3.1 显热储热材料及选择

➤ 显热储热材料的选择



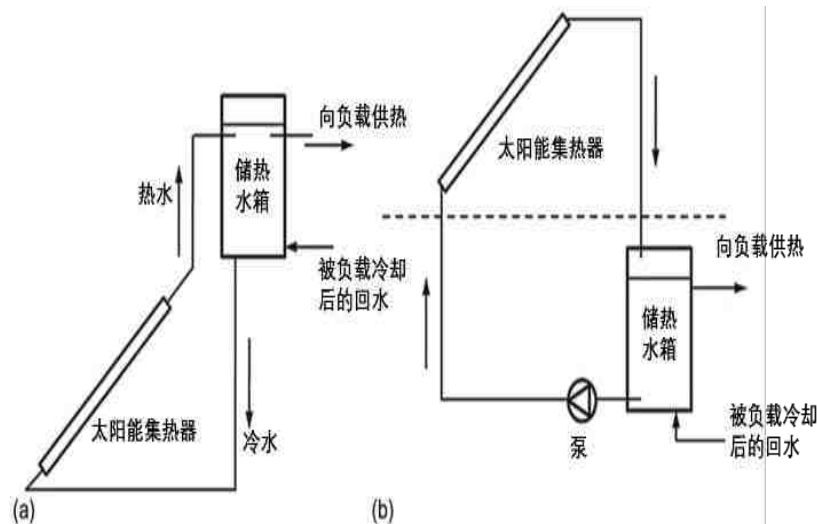
6.3 显热储热技术

□ 6.3.2 典型显热储热技术的工作特性

➤ 水箱储热

传热介质首先在集热器中吸收太阳能，然后再输送到储热容器中进行储存。当夜间或阴天需要热能时，再由负载工质流入储热容器中吸收热能。由于水具有较高的比热容和良好的对流传热特性，既可作为储热工质又可作为传热工质，因此**水是该系统最常见的储热材料之一**

被动式：传热介质不需要额外的动力设备输送，通过虹吸等现象自行流入储热系统进行放热



太阳能集热-储热供暖系统

主动式：需要泵等耗费能源的动力设备输送传热介质

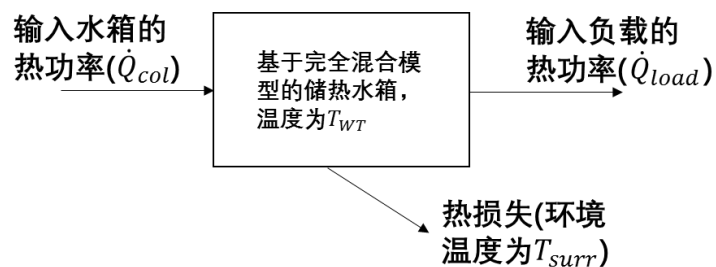
6.3 显热储热技术

6.3.2 典型显热储热技术的工作特性

➤ 水箱储热

完全混合模型：假设为水箱内的水温度为**均匀相等**的

$$(mc_p)_{WT} \frac{dT_{WT}}{dt} = \dot{Q}_{col} - \dot{Q}_{load} - (UA)_{WT}(T_{WT} - T_{surr})$$



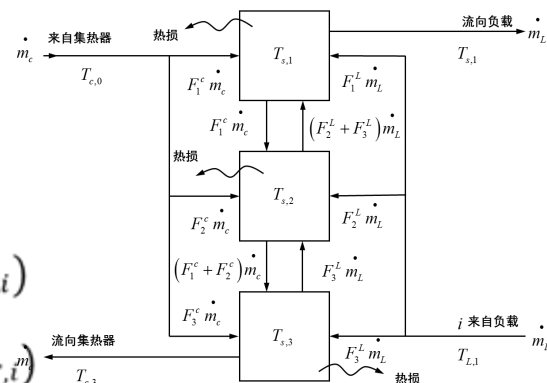
完全混合模型

分层模型：当水静置于水箱中时，由于散热会使得**密度大的冷流体**在重力作用下居于水箱**底层**，而**密度小的高温流体**居于水箱**上层**

$$F_i^{col} = \begin{cases} 1 & \text{若 } i = 1 \text{ 且 } T_{col,out} > T_{WT,1} \\ 1 & \text{若 } T_{WT,i-1} \geq T_{col,out} > T_{WT,i} \\ 0 & \text{若 } i = 0 \text{ 或 } i = N + 1 \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases}$$

$$F_i^{load} = \begin{cases} 1 & \text{若 } i = N \text{ 且 } T_{load,out} > T_{WT,N} \\ 1 & \text{若 } T_{WT,i-1} \geq T_{load,out} > T_{WT,i} \\ 0 & \text{若 } i = 0 \text{ 或 } i = N + 1 \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} m_{WT,i} \frac{dT_{WT,i}}{dt} &= \left(\frac{UA}{c_p} \right)_{WT,i} (T_{surr} - T_{WT,i}) \\ &+ F_j^{col} \dot{m}_{col} (T_{col,out} - T_{WT,i}) \\ &+ F_j^{load} \dot{m}_{load} (T_{load,out} - T_{WT,i}) \\ &+ \begin{cases} \dot{m}_{m,i} (T_{WT,i-1} - T_{WT,i}) & \text{若 } \dot{m}_{m,i} > 0 \\ \dot{m}_{m,i} (T_{WT,i-1} - T_{WT,i}) & \text{若 } \dot{m}_{m,i+1} < 0 \end{cases} \end{aligned}$$



包含供热侧和负载侧的三节点水箱模型

6.3 显热储热技术

□ 6.3.2 典型显热储热技术的工作特性

- **例6-9：**某完全混合的水箱内水的质量为**1500 kg**，比热容为**4.19 kJ/(kg·°C)**，水箱与温度为**20°C**的环境间的总换热系数与换热面积之积为**11.1 W/°C**。在储热系统开始运行的第一个小时，水箱内的水温度为**45°C**，在系统启动后的**12**个小时内太阳能集热器输入水箱的热功率及水箱提供给负载的热功率见右表，试求**12**个小时候水箱的温度。

解：利用显示欧拉法求解式(6-31)可得

$$T_{WT}^+ = T_{WT} + \frac{\Delta t}{(mc_p)_{WT}} [\dot{Q}_{col} - \dot{Q}_{load} - (UA)_{WT}(T_{WT} - T_{surr})]$$

其中 $\Delta t = 3600$ 。根据上式求得的12个小时的 T_{WT} 及 T_{WT}^+ 被列于右表中(红体字部分)。

时间	$\dot{Q}_{col}$ kW	$\dot{Q}_{load}$ kW	T_{WT} °C	T_{WT}^+ °C
1	0	3.33	45	42.9
2	0	3.33	42.9	40.9
3	0	3.06	40.9	39
4	0	3.06	39	37.1
5	0	3.61	37.1	35
6	0	3.89	35	32.6
7	0	5	32.6	29.7
8	0	5.83	29.7	26.3
9	5.83	5.56	26.3	26.4
10	11.39	5.56	26.4	29.7
11	16.67	5	29.7	36.3
12	20.83	4.44	36.3	45.6

6.3 显热储热技术

□ 6.3.2 典型显热储热技术的工作特性

➤ 填充床储热

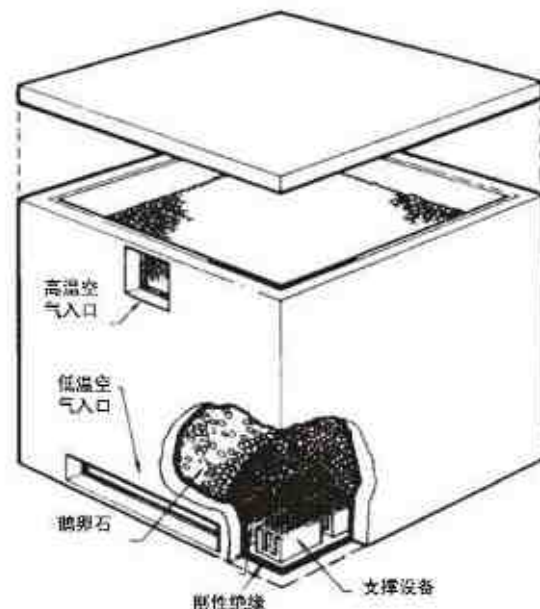
利用松散堆积的**颗粒的热容**来储存热量的设备

备 **运行原理**：高温空气从某一方向流入、流出储热单元完成储热，低温空气从相反的方向流入、流出完成放热

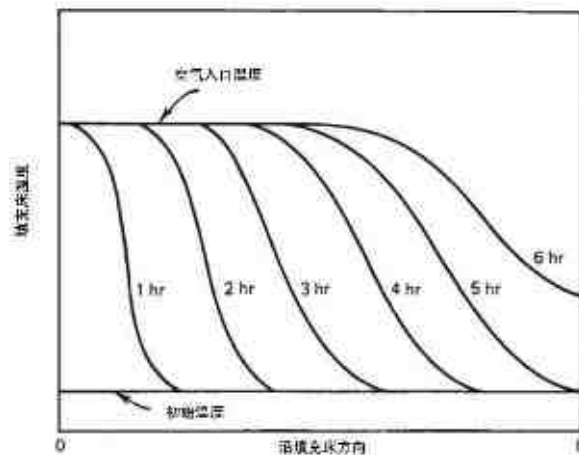
特点：有着极为明显的**温度分层**现象

由于岩石颗粒与空气之间的**高对流换热系数**

以及**充分的换热面积**，导致空气在刚流入填充床时就可释放大量的热量，这导致距离空气入口较近的岩石颗粒**很快升温**，而距离出口较近的岩石颗粒将在很长时间仍**保持起始温度值**



典型的填充床储热单元



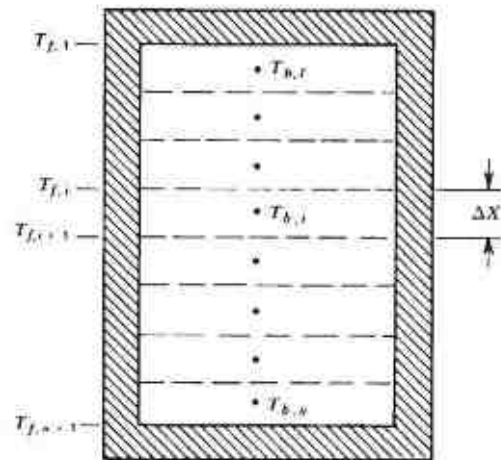
空气入口温度恒定时填充床的温度分布

6.3 显热储热技术

6.3.2 典型显热储热技术的工作特性

➤ 填充床储热

数学模型：假设流体在填充床内的流动为**径向不考虑流速、浓度梯度的一维活塞流**；**忽略颗粒内部的温度梯度**
忽略储热单元与环境之间的**换热**



用于数值计算的填充床模型

$$(\rho c_p)_f \epsilon \frac{\partial T_f}{\partial t} = -\frac{(\dot{m} c_p)_f}{A} \frac{\partial T_f}{\partial x} + h_v (T_b - T_f)$$

$$(\rho c_p)_b (1 - \epsilon) \frac{\partial T_b}{\partial t} = h_v (T_f - T_b)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial (x/L)} = NTU (T_b - T_f)$$

$$NTU = \frac{h_v A L}{(\dot{m} c_p)_f}$$

$$Bi = hR/k$$

$$\frac{T_{f,i+1} - T_{b,i}}{T_{f,i} - T_{b,i}} = e^{NTU/N}$$

$$(\dot{m} c_p)_f (T_{f,i} - T_{f,i+1}) = (\dot{m} c_p)_f (T_{f,i} - T_{b,i}) \eta$$

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = -L \frac{\partial T}{\partial \theta}$$

$$\frac{dT_{b,i}}{d\theta} = \eta N (T_{f,i} - T_{b,i})$$

6.3 显热储热技术

□ 6.3.2 典型显热储热技术的工作特性

- **例6-10：**某堆积床储热单元的主要参数如下：沿流体流向的长度为1.8 m，截面积为14.8 m²，空气流速、密度、比热分别为0.053 m/s、1.004 kg/ m³、1.01 kJ/(kg·°C)颗粒当量球体直径为12.5 mm，空隙率为0.47，颗粒密度、比热容和导热率分别为1350 kg/ m³、0.9 kJ/(kg·°C)、0.85 W/(°C·m)，颗粒单位体积的表面积为255 m²/ m³，体积对流换热系数为2030 W/(m³·°C)，试求该堆积床储热单元的Bi和NTU，在此基础上分析颗粒温度梯度对填充床性能的影响，并判断该填充床模型是否可用无穷大NTU进行简化。

解：根据题中所给条件，可求得颗粒与空气之间的对流换热系数为

$$h = \frac{h_v}{255} = \frac{2030}{255} \text{ W/(m}^3 \cdot ^\circ\text{C)} = 8.8 \text{ W/(m}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$$

进而可求得Bi为

$$Bi = \frac{hR}{k} = \frac{8.8 \times 0.0125/2}{0.85} = 0.059 < 0.1$$

因此颗粒温度梯度对填充床性能的影响可忽略。

$$NTU = \frac{h_v AL}{(\dot{m} c_p)_f} = \frac{2030 \times 14.8 \times 1.80}{0.053 \times 14.8 \times 1.004 \times 1010} = 68 > 10$$

因此填充床模型可用无穷大NTU进行简化。

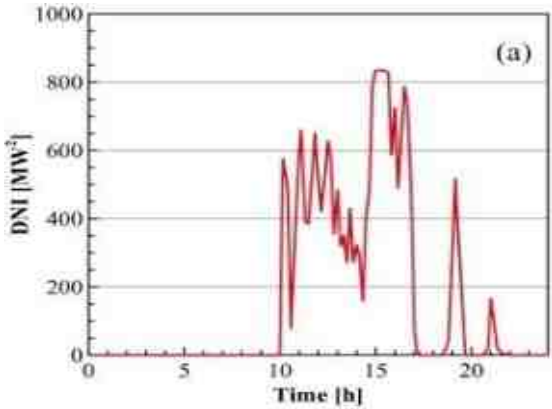
6.3 显热储热技术

6.3.3 显热储热工程应用实例

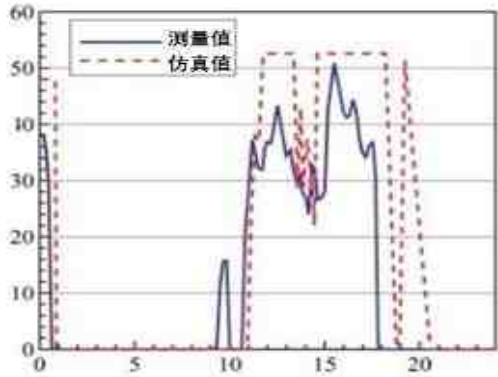
类别	Andasol- I	Andasol-II	Andasol-III
集热器	Flagsol SKL-ET150	Flagsol SKL-ET150	Flagsol SKL-ET150
反射镜	Flagbeg RP3	Flagbeg RP3	Rioglass
采光面积	510120 m ²	510120 m ²	510120 m ²
集热管	Schott (PTR70)	Schott (PTR70)	Schott (PTR70)
导热油	Dowtherm A	Dowtherm A	Dowtherm A
储热	7.5小时双罐熔盐储热	7.5小时双罐熔盐储热	7.5小时双罐熔盐储热
汽轮机	Siemens SST700	Siemens SST700	MAN
燃气补燃比例	12%	12%	12%



用于数值计算的填充床模型



强烈云遮天气下DNI 实测值



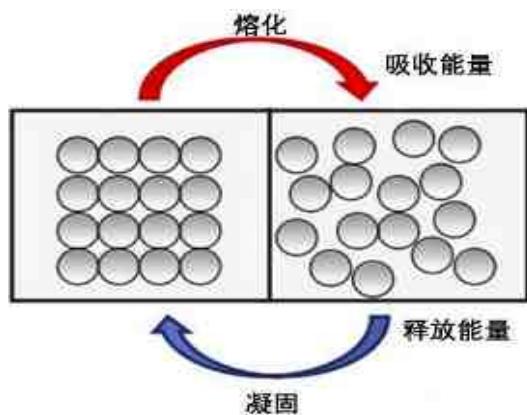
电站发电功率实测值与模型仿真值

6.4 潜热储热技术

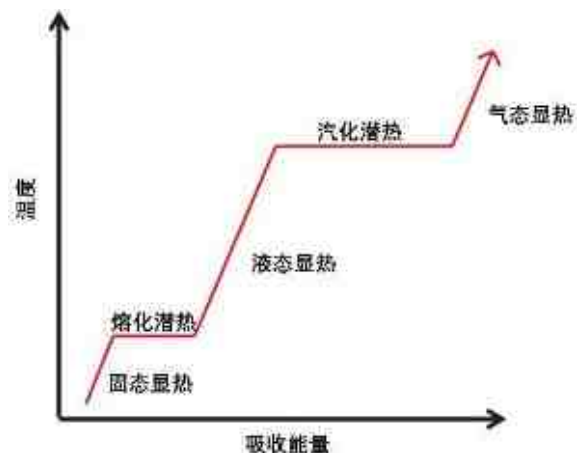
□ 6.4.1 相变材料储热的原理

➤ 基本原理

当一种物质从**固态**转变为**液态**时，它从周围环境中吸收能量，同时温度保持恒定或接近**恒定**。被吸收的能量将增加原子或分子的能量，加强了它们的**振动状态**。在熔融温度下，**原子键松动**，材料从固体转变为液体。凝固是熔融的逆过程，在这一过程中，材料将能量释放到周围环境中，分子失去能量的同时排列成固相



相变材料内的分子在一次熔融-凝固循环中的变化



物质在吸热过程中的从过冷固相到过热气相的温度变化曲线

6.4 潜热储热技术

□ 6.4.1 相变材料储热的原理

➤ 结晶与过冷

结晶：一阶的**热力学相态变化**，在液态固态共存的期间，系统的**平衡温度不变**，等于凝固点。结晶主要包括二个现象：**成核**和**晶体生长**。成核是指分子开始聚集形成晶核，在纳米尺度以某种周期的形式排列，其**排列方式**决定了**晶体结构**。晶体生长就是晶体持续的变大，晶核周围的物质通过扩散在晶核表面吸附，最终长成具有一定**几何形状的晶体**

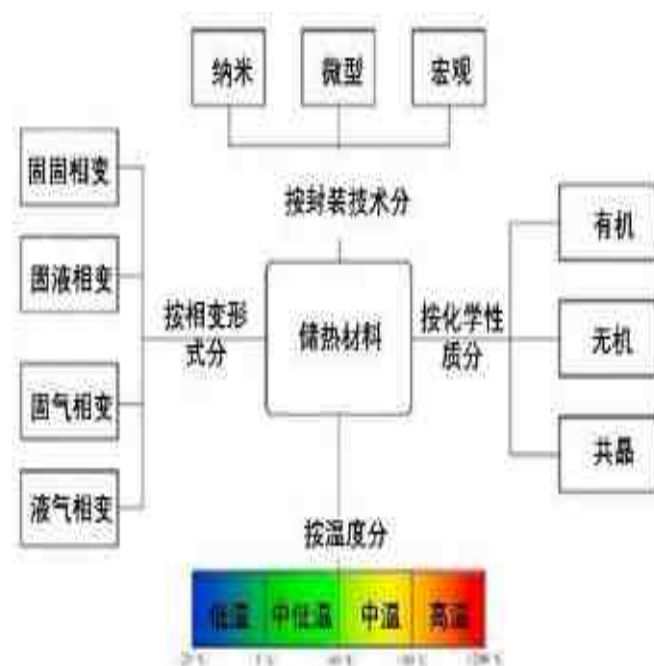
过冷：指液体**低于熔点而没有凝固**的现象。若容器的表面**不规则**，或是有**固体或气体的杂质**，就可能会产生**非匀相核化结晶**。对于相变材料来说，**晶体生长率低、过冷度大会带来潜热难以完全利用**的问题

6.4 潜热储热技术

□ 6.4.2 相变材料

➤ 材料的分类

相变材料有非常多种，其分类方法也有很多，主流的分类方法如图所示，分别有**相变分类法**、**化学分类法**、**封装分类法**和**按使用温度分类**的方法。在本文中，我们首先将按照化学的方法，将相变材料分类为**有机材料**、**无机材料**和**共晶材料**分别介绍，并在介绍过程中指出其适用温度的范围；而在介绍相变材料的**封装技术**时，按照**宏观封装**、**微型封装**以及**纳米封装**的分类方式进行介绍。



相变材料的分类方法

6.4 潜热储热技术

6.4.2 相变材料

➤ 有机材料

材料	类型	熔点 (°C)	潜热 (kJ/kg)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/(kg·K))	k (W/(m·K))
正十八烷	石蜡	29	244	814(固) 724(液)	2150(固) 2180(液)	0.358(固) 0.152(液)
正二十一烷	石蜡	41	294.9	773(液)	2386(液)	0.145(液)
正二十三烷	石蜡	48.4	302.5	777.6(液)	2181(液)	0.124(液)
正二十三烷	石蜡	51.5	207.7	773.6(液)	2924(液)	0.137(液)
IGI 1230A	调和石蜡	54.2	278.2	880(固) 770(液)	2800(液)	0.25(固) 0.135(液)
油酸	脂肪酸	13	75.5	871(液)	1744(液)	0.103(液)
癸酸	脂肪酸	32	153	1004(固) 878(液)	1950(固) 1720(液)	0.153(液)
月桂酸	脂肪酸	44	178	1007(固) 965(液)	1760(固) 2270(液)	0.147(液)
棕榈酸	脂肪酸	64	185	989(固) 850(液)	2200(固) 2480(液)	0.162(液)
			理			

6.4 潜热储热技术

□ 6.4.2 相变材料

➤ 无机材料

化学式	名称	峰值熔点 (°C)	潜热 (kJ/kg)	ρ (kg/m ³)	k (W/(m·K))
MgCl ₂ ·6H ₂ O	六水氯化镁	117	168.6	1569(固) 1450(液)	0.694(固) 0.579(液)
CaCl ₂ ·6H ₂ O	六水氯化钙	29	170-192	1802(固) 1562(液)	1.008(固) 0.561(液)
NaSO ₄ ·10H ₂ O	芒硝	32	251	1485(固)	0.544
NaNO ₃	硝酸钠	307	172	2260(固)	0.5
KNO ₃	硝酸钾	333	266	2110(固)	0.5
MgCl ₂	氯化镁	714	452	2140(固)	-
NaCl	氯化钠	802	492	2160(固)	5.0

优势：熔点覆盖范围广，相变发生于某个具体的熔点而非糊状区，
导热率高，密度高

6.4 潜热储热技术

6.4.2 相变材料

➤ 共晶材料

两种具有相似或相同熔点、凝固点的相变材料的组合，可分为有机-有机类，无机-无机类以及有机-无机类三种。

特点

- ✓ 熔化和凝固不会出现结晶不均匀的偏析现象
- ✓ 具有高导热率及高密度
- ✓ 可通过控制组成成分来获得具有预期相变温度的材料

➤ 三种材料的对比

有机相变材料	无机材料	共晶材料
(1)无过冷 (2)熔点覆盖范围宽 (3)化学和物理稳定性好 (4)潜热高 (5)一致共融 (6)可燃 (7)导热率低 (8)储热密度低	(1)潜热高 (2)导热率高 (3)相变时密度变化小 (4)不可燃 (5)存在过冷 (6)有腐蚀性 (7)无法一致共融 (8)储热密度高	(1)熔点高 (2)储热密度高 (3)成本高 (4)物性参数不全

6.4 潜热储热技术

□ 6.4.2 相变材料

➤ 材料的选择

相变材料主要物性参数的评价和选择标准

热物理特性	(1) 相变温度应符合具体工程应用的温度范围 (2) 单位体积的潜热量高，以节省存储空间 (3) 导热率高，以缩短充、放热过程所需的时间 (4) 比热容高，以便除了潜热以外的显热部分也能够被使用 (5) 相变时的体积变化率低，相变所需的压力低，以保障相变材料存储容器的安全性 (6) 相变材料为一致熔融化合物，以保证材料在不同相态时其成分完全一致 (7) 循环稳定性好，以保证材料在长时间运行过程中频繁相变时性能稳定
动力学特性	高晶体生长率，低过冷度，使得相变材料在熔点时将潜热提出
化学特性	(1) 与存储容器所使用的材料化学兼容，且不会相互腐蚀 (2) 在长期、频繁的相变过程中不会发生降解 (3) 无毒，非易燃易爆，以保证安全
经济学特性	(1) 低成本高效益，易于获得
环境特性	(1) 对环境影响小，无污染 (2) 具备可回收潜质

6.4 潜热储热技术

6.4.2 相变材料

➤ 材料的选择

相变材料的热分析测试技术

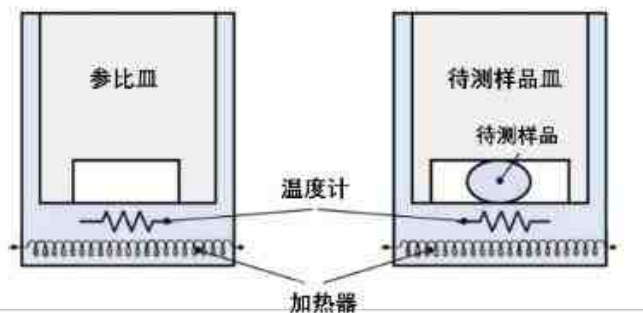
热分析法	定义	测量参数	应用范围
差热分析法 (DTA)	程序控温条件下，测量在升温、降温或恒温过程中样品和参比物之间的温度差	温度	熔化及结晶转变、二级转变、氧化还原反应、裂解反应等的分析研究，主要用于定性分析
差示扫描量热法 (DSC)	程序控温条件下，直接测量样品在升温、降温或恒温过程中所吸收或释放出的能量	热量	分析研究范围与DTA大致相同，但能定量测定多种热力学和动力学参数，如比热、反应热、潜热、反应速度和高聚物结晶度等
热重法 (TG)	程序控温条件下，测量在升温、降温或恒温过程中样品质量的变化	质量	熔点、沸点测定，热分解反应过程分析与脱水量测定等；生成挥发性物质的固相反应分析，固体与气体反应分析等
动态热机械法 (DMA)	程序控温条件下，测量材料的力学性质随温度、时间、频率或应力等改变而发生的变化量	力学性质	阻尼特性，固化，胶化、玻璃化等转变分析；模量、粘度测定等
热机械分析法	程序控温条件下，测量在升温、降温或恒温过程中样品尺寸发生的变化	尺寸、体积	膨胀系数、体积变化、相变温度、应力应变关系测定，重结晶效应分析等

6.4 潜热储热技术

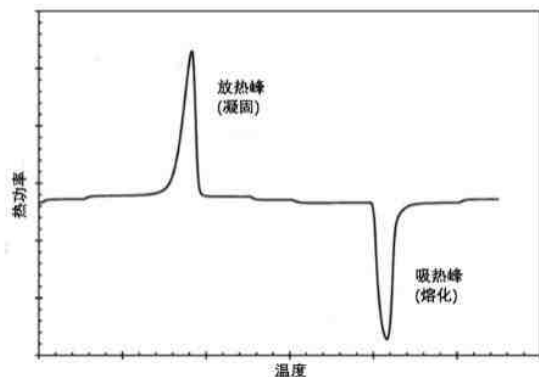
□ 6.4.2 相变材料

例6-11：如做下图所示为一个典型的差示扫描量热仪结构示意图，它是在程序控制温度条件下，测量输入给样品与参比物的功率差与温度关系的一种热分析方法。实验过程中记录的信息是保持样品和参比样品的温度相同时，两者的热量之差，假设该量热仪将用于测量某个相变材料的相变过程，试根据材料相变的实际物理过程简要绘制测试结果的热流差-温度曲线。

解：绘制的曲线如右下图所示，在相变材料的凝固阶段，由于材料本身会在此过程中释放潜热，因此相变材料与参比样品之间会产生热流差，此时曲线出现放热峰；而在相变材料的熔化阶段，由于材料在此阶段会吸收潜热，因此相变材料与参比样品之间同样会产生热流差，此时曲线将出现吸热峰。



典型的差示扫描量热仪结构示意图



利用差示扫描量热仪测量的某相变材料的热流差-温度曲线

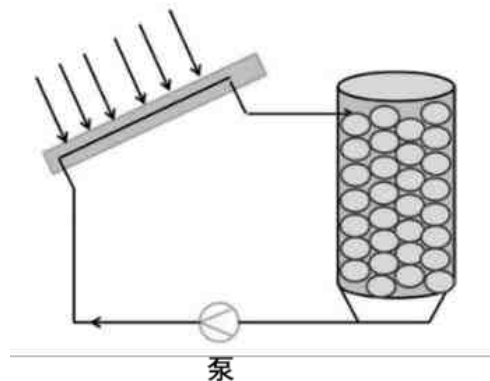
6.4 潜热储热技术

□ 6.4.3 相变材料的封装与强化换热

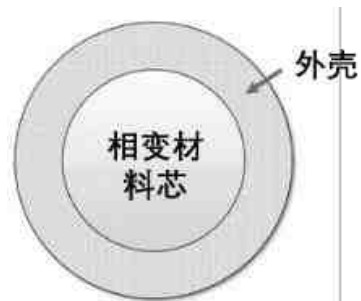
➤ 相变材料的封装

装 两大难题

- ✓ 实现相变过程的**可控**以提升系统可靠性;
- ✓ 相变过程中的**体积收缩**问题。



球形封装容器用于填充床储热系统



封装于微胶囊中的相变材料颗粒

宏胶囊法

固-液相变储热材料表面包覆一层性能稳定的外壳或者膜以防止其泄露，
粒径在**1 nm以上**

微胶囊法

以聚合物为外壳，以相变材料为核，粒径在**1 nm以**

下 定形相变材料

液态相变材料和液态聚合物混合而成，且所选聚合物的熔点应当远高于相变材料的熔点

6.4 潜热储热技术

□ 6.4.3 相变材料的封装与强化换热

➤ 相变材料的强化换热

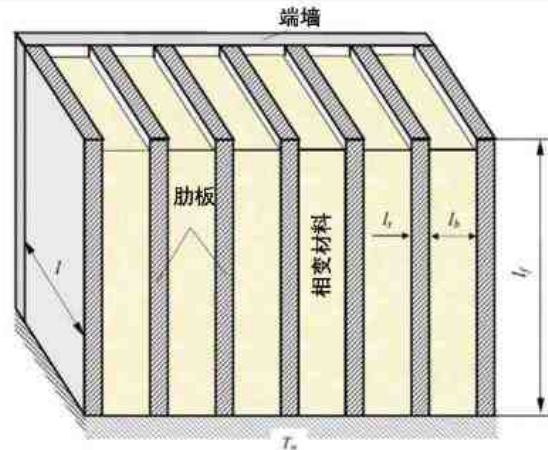
传热速率是决定一个潜热储热系统性能的关键，传热速率是由传热温差、相变材料导热率以及换热面积决定的。对于某个具体的应用场景，其热源、负载、环境温度以及相变材料的熔点都是确定的，因此增大换热面积和提高材料导热率就成为潜热储热系统强化换热主要的两个研究方向。

利用肋板增加换热面积

通过在相变材料中插入肋板以扩展换热面积

积 填充高导热率材料

通过向相变材料中填充高导热材料来实现，主要的填充方式有三种：将相变材料注入到高导热率的多孔材料中、在相变材料中添加高导热材料颗粒、在相变材料中添加固定形状的金属材料



用于扩展相变材料换热面积的肋板

6.4 潜热储热技术

□ 6.4.3 相变材料的封装与强化换热

例6-12: 在潜热储热技术中, 球形胶囊是相变材料的一种常见的封装方式。假设某个潜热储热系统, 采用导热率为 0.2 W/m K 的聚氯乙烯作为原料被制备成内直径为 10 cm 壁厚为 2 mm 的球形胶囊, 胶囊内封装了密度为 772 kg/m^3 、相变潜热为 200 kJ/kg 、熔点为 30°C 的石蜡作为相变材料。在充热过程中, 测得胶囊内、外壁面温度分别为 30°C 和 40°C , 环境温度保持在 25°C , 试求: (1) 充热过程中的换热速率; (2) 石蜡完全融化所需的时间; (3) 充热过程中球形胶囊内的熵损。

解: (1) 根据式(6-23)可知, 充热过程中的换热速率($\dot{Q}_{charge}$)为

$$\dot{Q}_{charge} = 4\pi \times 0.2 \times \frac{40 - 30}{1/0.05 - 1/0.052} \text{ W} = 32.67 \text{ W}$$

(2) 根据式(6-2)和(6-5)可得

$$\frac{dmh_{sf}}{dt} = \frac{dV\rho h_{sf}}{dt} = \dot{Q}_{charge}$$

将上式差分并带入题中所给的材料物性、球体尺寸后可求得石蜡完全融化所需的时间($\Delta t_{melting}$)为

$$\Delta t_{melting} = 2474 \text{ s}$$

(3) 由公式(6-11)和(6-13)可知, 对于球形胶囊建立的熵平衡方程为

$$\sum \dot{E}x_{heat} - \dot{E}x_{dest} = 0$$

$$\left(1 - \frac{T_0}{T_{outer}}\right) \dot{Q}_{charge} - \left(1 - \frac{T_0}{T_{inner}}\right) \dot{Q}_{charge} - \dot{E}x_{dest} = 0$$

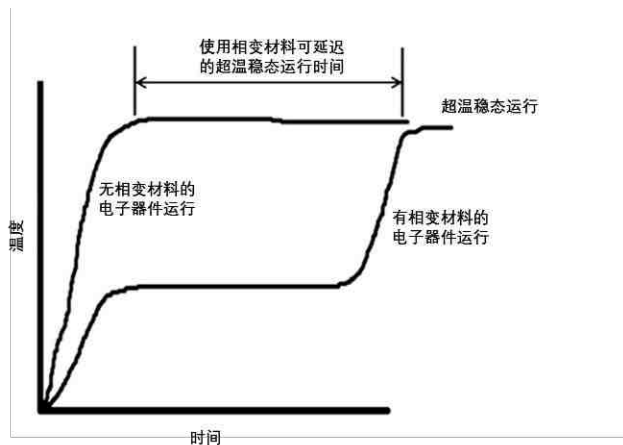
最终可求得充热过程中球形胶囊内的熵损($\dot{E}x_{dest}$)为 1.026 W 。

6.4 潜热储热技术

□ 6.4.4 潜热储热技术应用

➤ 电子设备热管理

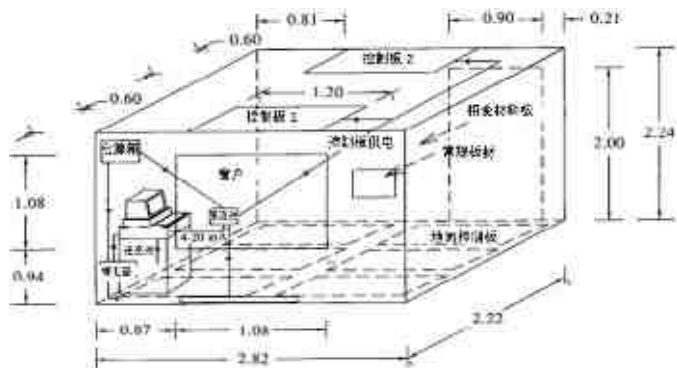
相变材料可以用来吸收高负荷运行时热量，然后在关机或者低功耗待机模式时散发储存的热量。当高负荷运行模式开始时，设备产生的热量使得环境温度升高，由温差驱动的传热将促使相变材料吸热并熔化。由于潜热的存在，设备可在高负荷运行状态下仍保持



相变材料对设备稳态超温运行的延迟作用

➤ 恒温建筑储热

建筑材料中嵌入相变材料是一种降低建筑耗能的有效方法。根据不同的应用场景和建筑材料，相变材料可采用直接浸入法、宏胶囊法或微胶囊法嵌入建筑材料中



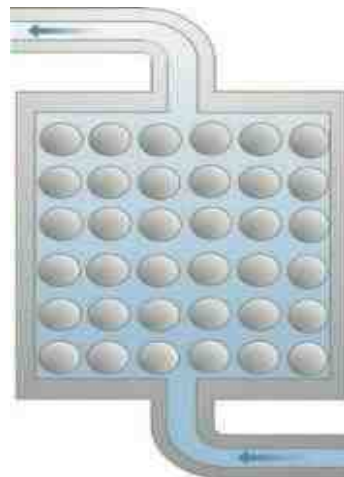
全室内相变材料储热实验

6.4 潜热储热技术

□ 6.4.4 潜热储热技术应用

➤ 填充床储热

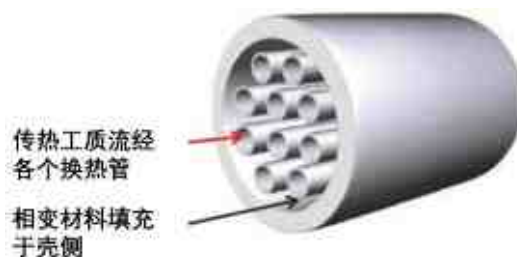
采用装有相变材料的宏胶囊，紧密堆积在罐体内部。该系统由于具有高热交换接触面积且可以在一个单罐中实现充放热，与双罐系统相比显著降低了成本。此外，宏胶囊封装后的相变材料也增加了系统的可



基于宏胶囊封装相变材料的填充床储热系统

➤ 可靠性 换热器储热

相变材料可被用于换热器以提高系统性能。以聚光太阳能热发电系统为例，传热介质在流经集热场吸热升温后，无论是流向储热系统还是发电系统，都要在换热器中放热，若将合适的相变材料用于换热器，可进一步提高太阳能的利用率



相变材料位于壳侧的管壳式换热器

6.4 潜热储热技术

□ 6.4.4 潜热储热技术应用

例6-13: 某双层楼房的屋顶面积为**117 m²**，四周墙壁的总面积为**223 m²**，为了清洁采暖，该楼房的屋顶和墙壁都采用水合盐作为相变储热材料储存由太阳能集热器吸收的太阳能，为了进一步增强采暖效果，屋顶和墙壁分别覆盖了厚度为**0.15 m**和**0.025 m**的保温材料，已知保温材料的导热率为**0.025 W/(m·°C)**，集热器24小时内吸收的太阳能平均值为**4500 kJ/m²**，水合盐潜热为**337 kJ/kg**，单位面积太阳能集热器的价格为**75元/m²**，单位质量的水合盐价格为**3元/kg**，假设屋顶及墙壁的温度维持在**21°C**而外界温度为**-12°C**，求所需的太阳能集热器的价格及水合盐的价格。

解：由式(6-19)可得，屋顶和墙壁透过保温材料向环境的热损($\dot{Q}_{loss,roof}$ 、 $\dot{Q}_{loss,wall}$)分别为

$$\dot{Q}_{loss,roof} = k \frac{A_{roof}}{L_{roof}} (T_{roof} - T_{amb}) = 643.5 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{loss,wall} = k \frac{A_{wall}}{L_{wall}} (T_{wall} - T_{amb}) = 7359 \text{ W}$$

则一个全天内，为补偿上述热损，所需的水合盐质量(m_{PCM})为：

$$m_{PCM} = \frac{(\dot{Q}_{loss,roof} + \dot{Q}_{loss,wall}) \times 24 \times 3600}{h_{PCM}} = 2051 \text{ kg}$$

可求得水合盐的耗费(C_{PCM})为 $C_{PCM} = m_{PCM} \times 3 = 6153 \text{ 元}$

水合盐中的潜热实际上是由太阳能集热器提供，因此所需的太阳能集热器面积($A_{collector}$)为

$$A_{collector} = \frac{(\dot{Q}_{loss,roof} + \dot{Q}_{loss,wall}) \times 24 \times 3600}{Q_{collector}} = 154 \text{ m}^2$$

可求得太阳能集热器的耗费($C_{collector}$)为 $C_{collector} = A_{collector} \times 75 = 11550 \text{ 元}$

6.5 热化学储热技术

□ 6.5.1 热化学吸附储热

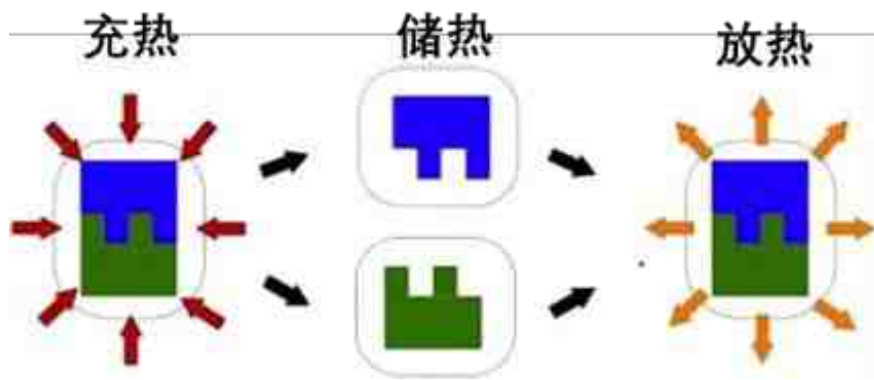
➤ 机理及特点

吸附质分子与固体表面原子形成吸附化学键

过程中所伴随的能量储存与释放

特点

- ✓ 储热密度大，可实现变温储热；
- ✓ 应用范围广



热化学吸附储热的充热及放热过程

分类

- ✓ 液体吸附介质：一般结晶水合物体系以及 NaOH 、 LiCl 和 LiBr 等的溶液
- ✓ 固体吸附介质：天然沸石、磷酸铝和磷酸硅铝等

6.5 热化学储热技术

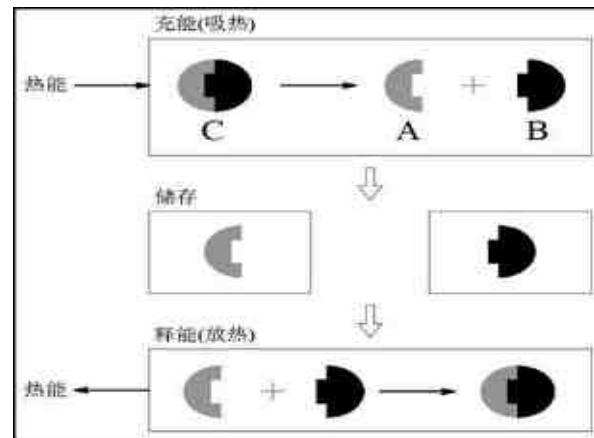
□ 6.5.2 热化学反应储热

➤ 机理及特点

利用可逆化学反应，将热能转化成化学能，
并储存于反应介质中。

特点

- ✓ 体积和质量储热密度均远高于显热储热或相变储热；
- ✓ 反应产物以化学能形式可在环境温度下长期储存且基本没有热损失，
并且可以实现长距离运输
- ✓ 热化学储热采用化学反应实现能量的储存和转换，可以得到高品位的
热能



热化学反应储热的充热、储热及放热过程

6.5 热化学储热技术

□ 6.5.2 热化学反应储热

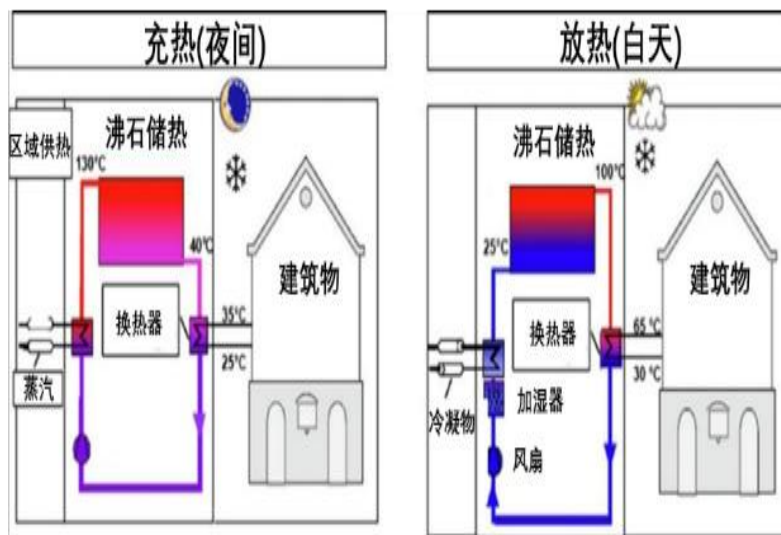
储热体系	反应通式	典型介质	特点
金属氧化物	$M_xO_{y+z}(s) \rightleftharpoons M_xO_y(s) + \frac{z}{2}O_2(g)$	BaO、Co ₃ O ₄ 、 Mn ₂ O ₃ 、CuO、 Fe ₂ O ₃ 、 Mn ₃ O ₄ 和V ₂ O ₅	优势：操作温度范围宽、无腐蚀性、不需气体储存 劣势：成本高、储热密度低、可逆性欠佳
金属氢化物	$MH_n(s) + \Delta H_r \rightleftharpoons M(s) + \frac{n}{2}H_2(g)$	MgH ₂ 、TiH ₂ 、 CaH ₂	优势：储热密度大 劣势：平衡压力高，安全性低
氢氧化物	$M(OH)_2(s) + \Delta H_r \rightleftharpoons MO(s) + H_2O(g)$	Ca(OH) ₂ 和 Mg(OH) ₂	优势：成本低、无毒 劣势：导热率低，存在烧结现象
碳酸盐	$MCO_3(s) + \Delta H_r \rightleftharpoons MO(s) + CO_2(g)$	MCO ₃	优势：成本低、工作温度高、储热密度大、工作压力低、无毒 劣势：稳定性欠佳
氨基	$2NH_3(g) + \Delta H_r \rightleftharpoons N_2(s) + 3H_2(g)$	NH ₃	优势：可逆性好，稳定性佳、便于输送、经济性高、技术成熟度高 劣势：安全性低、反应条件苛刻、系统运维成本高
甲烷重整	$CH_4(g) + H_2O(l) + \Delta H_r \rightleftharpoons CO(g) + 3H_2(g)$ (基于H ₂ O的重整) $CH_4(g) + CO_2(g) + \Delta H_r \rightleftharpoons 2CO(g) + 2H_2(g)$ (基于CO ₂ 重整)	CH ₄	优势：反应热高、储热密度高 劣势：积碳易造成催化剂失活

6.5 热化学储热技术

□ 6.5.3 热化学储热应用

➤ 热化学吸附储热应用

热化学吸附储热系统可以在较宽的温度范围内储存长期/中期/短期应用的热量，以应用于制冷和供热场景之中。德国慕尼黑的ZAE研究所提出了一个应用于办公建筑的热化学吸附储热系统，如右图所示。在夜间的充热过程中，空气被余热加热到 130°C 左右并存储在沸石之中。在白天时段，沸石中储存的能量释放出来以满足建筑物的用热需求。同时，该系统还可以用于建筑物的制冷需求



用于区域供热和制冷的热化学吸附储热系统

6.5 热化学储热技术

6.5.3 热化学储热应用

➤ 热化学反应储热应用

热化学反应储热具有较多的储热体系，且不同体系各有特点，根据其应用场景的温度范围不同，大致可分为**制冷和冷却应用**、**中温应用**以及**高温应用**三种。

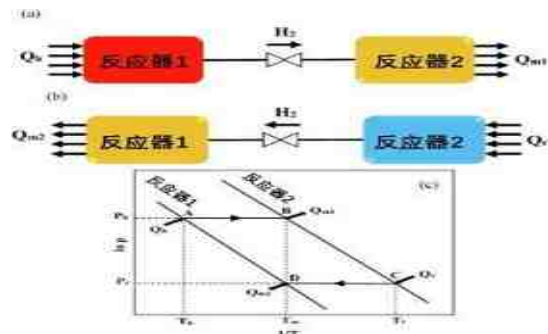
制冷和冷却应用

碳酸盐体系和**金属氢化物体系**可用于**制冷和冷却 中温应用**

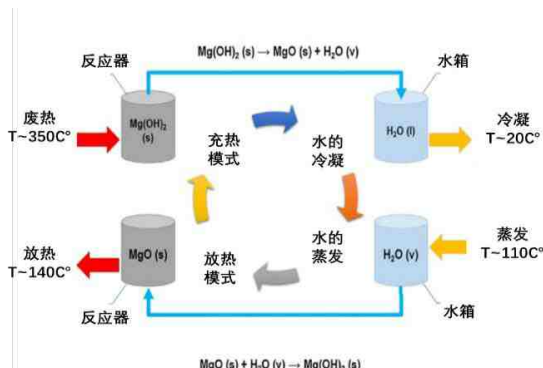
热化学储热在中温范围内主要用于太阳能和余热的储存，**氢氧化物储热体系**为主要代表

高温应用

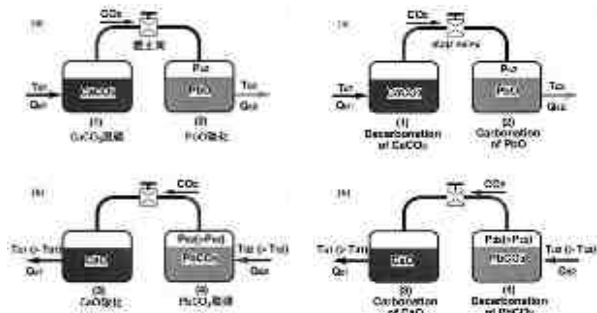
碳酸盐、**金属氢化物**、**氨基储热体系**、**甲烷重整**等体系中有不少介质均可适用于高温范围



制冷和冷却应用：金属氢化物冷却系统

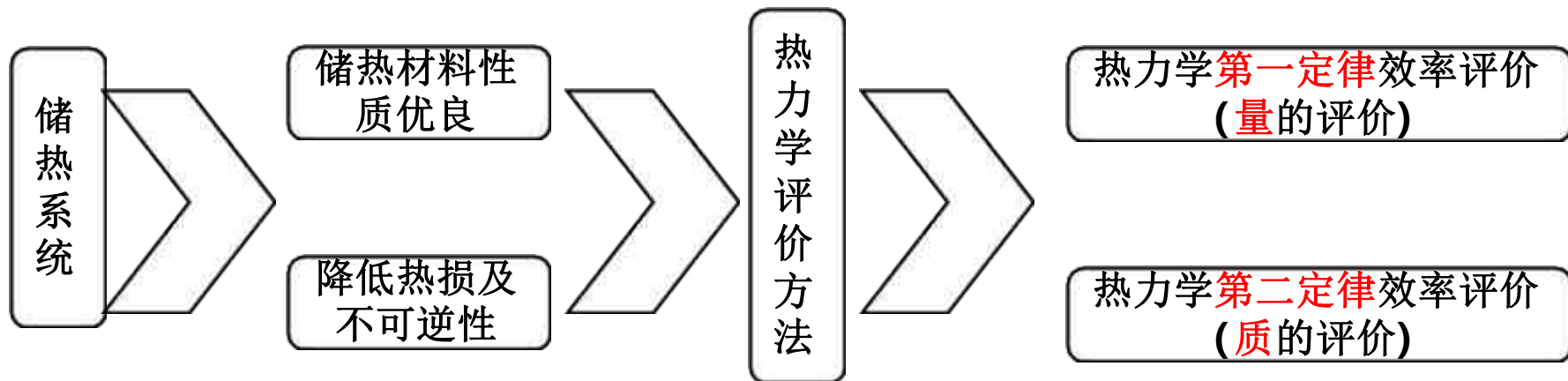


中温应用：氢氧化物化学热泵循环

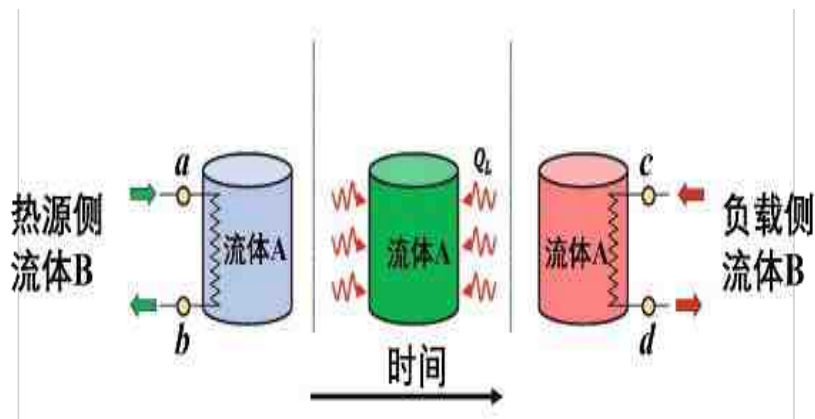


高温应用：碳酸盐化学热泵循环

6.6 储热系统的热力学评价方法



如右图所示为一个本章用于介绍热力学评价方法的典型储热系统，储热罐中的介质为**A**，热源侧与负载侧的流体**B**通过与**A**进行换热来传递热量。



典型的储热系统示意图

6.6 储热系统的热力学评价方法

➤ 热力学第一定律效率评价

定义某一个系统的**热力学第一定律效率** η 为

$$\eta = \frac{\text{能量的收益}}{\text{能量的投入}}$$

充、放热过程中热量和焓变的关系可表示为

$$Q_C = \int_{t=0}^{t_C} \dot{m}_a c_a (T_b(t) - T_a(t)) dt$$

$$Q_D = \int_{t=0}^{t_D} \dot{m}_c c_c (T_c(t) - T_d(t)) dt$$

一个充放热循环内的热力学第一定律**总效率**($\eta_{overall}$)、**充热效率**(η_C)、**静置效率**(η_{ST})、**放热效率**(η_D)分别为

$$\eta_{overall} = \frac{Q_D}{Q_C}$$

$$\eta_C = \frac{\Delta E_{ST,C}}{H_b - H_a}$$

$$\eta_{ST} = \frac{\Delta E_{ST,C} - Q_L}{\Delta E_{ST,C}}$$

$$\eta_D = \frac{H_c - H_d}{\Delta E_{ST,D}}$$

6.6 储热系统的热力学评价方法

➤ 热力学第二定律效率评价

定义某一个系统的**热力学第二定律效率** ψ 为

$$\psi = \frac{\text{炯的收益}}{\text{炯的投入}}$$

充、放热过程中炯的变化关系可表示为

$$Ex_C = m_a c_a \left\{ (T_b - T_a) - T_o \ln \left(\frac{T_b}{T_a} \right) \right\}$$

$$Ex_D = m_c c_c \left\{ (T_c - T_d) - T_o \ln \left(\frac{T_c}{T_d} \right) \right\}$$

由于储热罐与环境的**热量交换**所产生的**热量炯** Ex_L ，可表示为

$$Ex_L = \left[1 - \frac{T_o}{T_s} \right] Q_L$$

储热罐本身的炯变化 ΔEx_{ST} 可表示为

$$\Delta Ex_{ST} = m_{St} \bar{c}_{ST} \left[(\bar{T}_{ST,f} - \bar{T}_{ST,i}) - T_o \ln \left(\frac{\bar{T}_{ST,f}}{\bar{T}_{ST,i}} \right) \right]$$

储热系统在一个充放热循环内的热力学第二定律**总效率**($\psi_{overall}$)、**充热效率**(ψ_C)、**静置效率**(ψ_{ST})、**放热效率**(ψ_D)分别为

$$\psi_{overall} = \frac{Ex_D}{Ex_C}$$

$$\psi_C = \frac{\Delta Ex_{ST,C}}{Ex_C}$$

$$\psi_{ST} = \frac{\Delta Ex_{ST,C} - Ex_L}{\Delta Ex_{ST,C}}$$

$$\psi_D = \frac{Ex_D}{\Delta Ex_{ST,D}}$$

6.6 储热系统的热力学评价方法

例6-14: 设有两个显热储热系统，两系统的热源侧和负载侧均采用水作为传热介质，在热源侧，系统1中水的进、出口温度分别为**80°C**和**30°C**，整个充热过程所需水的总质量为**500 kg**，系统2中水的参数与系统1完全一致；在负载侧，系统1中水的进、出口温度分别为**30°C**和**35°C**，整个放热过程所需水的总质量为**4500 kg**，而系统2中水的进、出口温度分别为**30°C**和**75°C**，整个放热过程所需水的总质量为**500 kg**，假设水的比热容保持在**4.186 kJ/(kg·°C)**，环境温度为**30°C**，试求两系统的第一定律效率和第二定律效率。

解：对于系统1，充热过程中储热系统吸收的总热量($Q_{C,1}$)和焓($Ex_{C,1}$)分别为

$$Q_{C,1} = (mc)_{HTF,C,1}(T_{in} - T_{out})_{HTF,C,1} = 500 \times 4.186 \times (80 - 30) = 104650 \text{ kJ}$$

$$\begin{aligned} Ex_{C,1} &= (mc)_{HTF,C,1} \left\{ (T_{in} - T_{out}) - T_o \ln \left(\frac{T_{in}}{T_{out}} \right) \right\}_{HTF,C,1} = 500 \times 4.186 \times \left\{ (353 - 303) - 298 \times \ln \left(\frac{353}{303} \right) \right\} \\ &= 9386.88 \text{ kJ} \end{aligned}$$

放热过程中负载吸收的总热量($Q_{D,1}$)和焓($Ex_{D,1}$)分别为

$$Q_{D,1} = (mc)_{HTF,D,1}(T_{out} - T_{in})_{HTF,D,1} = 4500 \times 4.186 \times (35 - 30) = 94185 \text{ kJ}$$

$$\begin{aligned} Ex_{D,1} &= (mc)_{HTF,D,1} \left\{ (T_{in} - T_{out}) - T_o \ln \left(\frac{T_{in}}{T_{out}} \right) \right\}_{HTF,D,1} = 4500 \times 4.186 \times \left\{ (308 - 303) - 298 \times \ln \left(\frac{308}{303} \right) \right\} \\ &= 2310.18 \text{ kJ} \end{aligned}$$

(接下页)

6.6 储热系统的热力学评价方法

类似地，对于系统2， $Q_{C,2}$ 、 $Ex_{C,2}$ 、 $Q_{D,2}$ 、 $Ex_{D,2}$ 分别为

$$Q_{C,2} = Q_{C,1} = 104650 \text{ kJ}$$

$$Ex_{C,2} = Ex_{C,1} = 2310.18 \text{ kJ}$$

$$Q_{D,2} = (mc)_{HTF,D,2}(T_{out} - T_{in})_{HTF,D,2} = 500 \times 4.186 \times (75 - 30) = 94,185 \text{ kJ}$$

$$Ex_{D,2} = (mc)_{HTF,D,2} \left\{ (T_{in} - T_{out}) - T_o \ln \left(\frac{T_{in}}{T_{out}} \right) \right\}_{HTF,D,2} = 500 \times 4.186 \times \left\{ (348 - 303) - 298 \times \ln \left(\frac{348}{303} \right) \right\}$$
$$= 7819.52 \text{ kJ}$$

则系统1的第一定律、第二定律效率分别为

$$\eta_{overall,1} = \frac{Q_{D,1}}{Q_{C,1}} = 90\%$$

$$\psi_{overall,1} = \frac{Ex_{D,1}}{Ex_{C,1}} = 25\%$$

系统2的第一定律、第二定律效率分别为

$$\eta_{overall,2} = \frac{Q_{D,2}}{Q_{C,2}} = 90\%$$

$$\psi_{overall,2} = \frac{Ex_{D,2}}{Ex_{C,2}} = 83\%$$

由上述结果可知，在两系统的第一定律效率完全相同的情况下，第二定律效率却有着极大的差异，因此，对于一个储热系统，不论是额定参数的设计还是运行策略的优化，只有兼顾两种效率下的评价结果，才能保证其具备优良的性能。

总结与展望

- 热能是不同品位能源之间转换的重要枢纽，在可再生能源装机容量急剧扩张的今天，发展出能够实现热能的规模化时空转移和高效利用的储热技术尤为重要；
- 本章首先介绍了学习储热技术所需的**热力学**基础和**传热学**基础；
- 依次从**材料物性及选择**、**典型技术**以及**工程案例**三个方面详细介绍了**显热储热**技术；
- 依次从**相变材料储热基本原理**、**材料物性及选择**、**封装与强化换热技术**以及**典型应用**三个方面详细介绍了**潜热储热**技术；
- 依次从**基本原理**和**典型应用**两个方面分别详细介绍了**热化学吸附储热**和**热化学反应储热**技术

6.7 总结与展望

- 显热储热技术未来应当致力于开发具备更高运行温度、更大储热密度的新材料；
- 潜热储热技术未来应当从探明分子结晶及能量转变等物理过程的机理、将实验和科学研究规模推向工程应用两个方面发展；
- 热化学储热技术未来应当致力于解决化学反应与传热的匹配、储热过程中系统运行参数和系统设计参数的控制以及提高充放热时的稳定性这三大问题

第七章 飞轮、超导与超级电容器

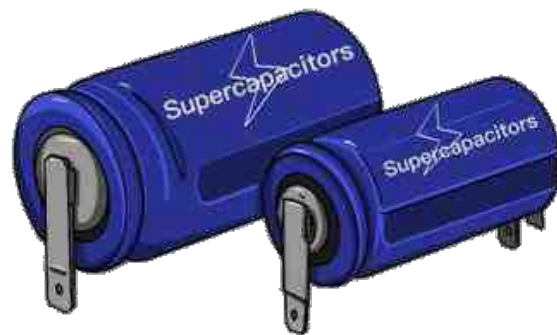
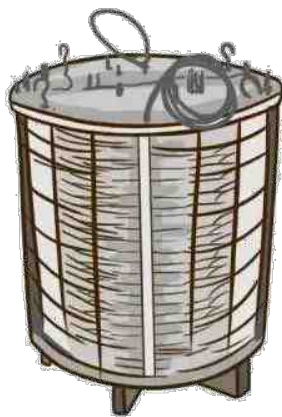
- ☐ 本章概述
- ☐ 飞轮储能
- ☐ 超导储能
- ☐ 超级电容
- ☐ 总结与展望

本章概述

□ 飞轮、超导与超级电容器储能的基本概念

飞轮储能、超导储能和超级电容器储能作为短时储能的代表储能技术，能够在较短 时间内输出更大的能量。采用这类储能技术，能满足短时间内要求实现不间断 和高品质的供电需求。

- 飞轮储能系统：通过机械能与电能之间的能量转换实现对能量的存储和释放。
- 超导储能系统：通过电磁能和电能之间的能量转换实现对能量的存储和释放。
- 超级电容器储能系统：通过双电层和氧化还原赝电容电荷储存电能实现对能量的存储和释放。



本章概述

□ 飞轮、超导与超级电容器储能的特点

◆ 瞬时功率大

飞轮储能、超导储能和超级电容器储能均具有**瞬时功率较高、放电时间短**特点。

◆ 储能效率高

飞轮储能、超导储能和超级电容器储能的**能量转换效率**均可高达**90%**左右，有利于实现能量的**高效转换**和**更低的损耗**。

◆ 循环寿命长

飞轮储能、超导储能和超级电容器储能均不涉及化学反应，且储能过程损耗小，因而**装置使用寿命长，循环利用次数高**。

◆ 环境依赖小

飞轮储能、超导储能和超级电容器储能均对安装和使用环境的要求较低，且具有**对环境影响小、便于维护**等优势。

本章概述

□ 飞轮、超导与超级电容器储能的作用

◆ 提高新能源并网稳定性

飞轮储能、超导储能和超级电容器储能均具有**瞬时功率较高**、**响应速度快**等特点，可以作为新能源发电厂的辅助服务设施，与大规模可再生能源联合运行，迅速平抑风电、光伏发电的功率波动，保障电网安全。

◆ 实现电能灵活调度

飞轮储能、超导储能和超级电容器储能均具有**使用寿命长**、**环境影响小**、**移动灵活**等特点。可自由移动，灵活应用于各短期电能需求场景。

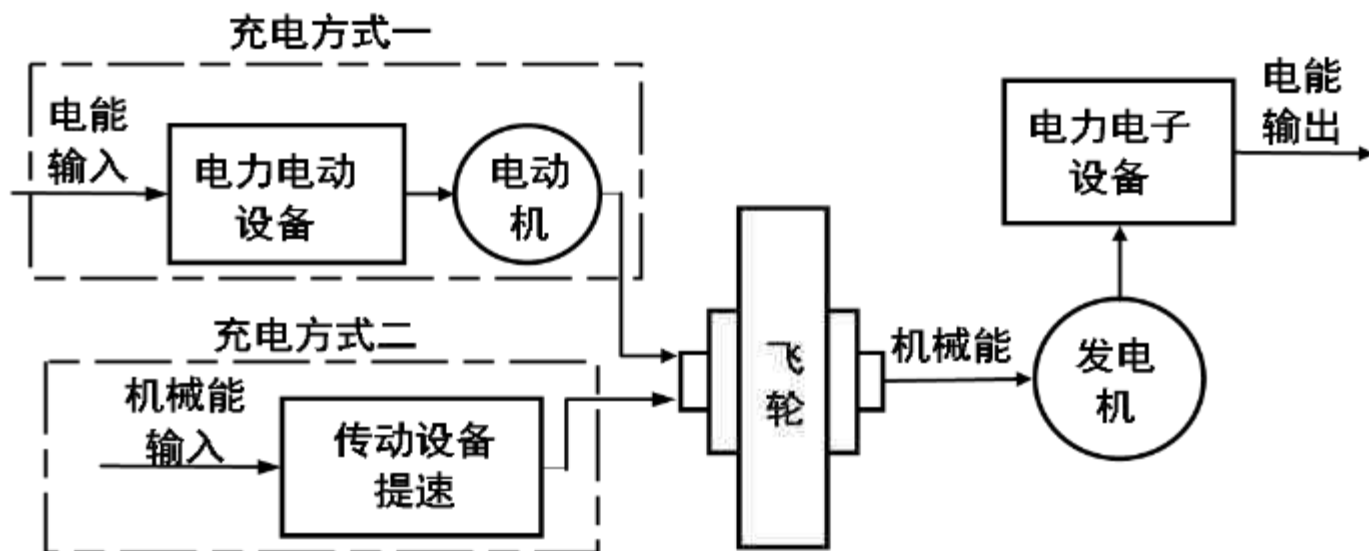


7.1 飞轮储能

□ 飞轮储能的基本概念

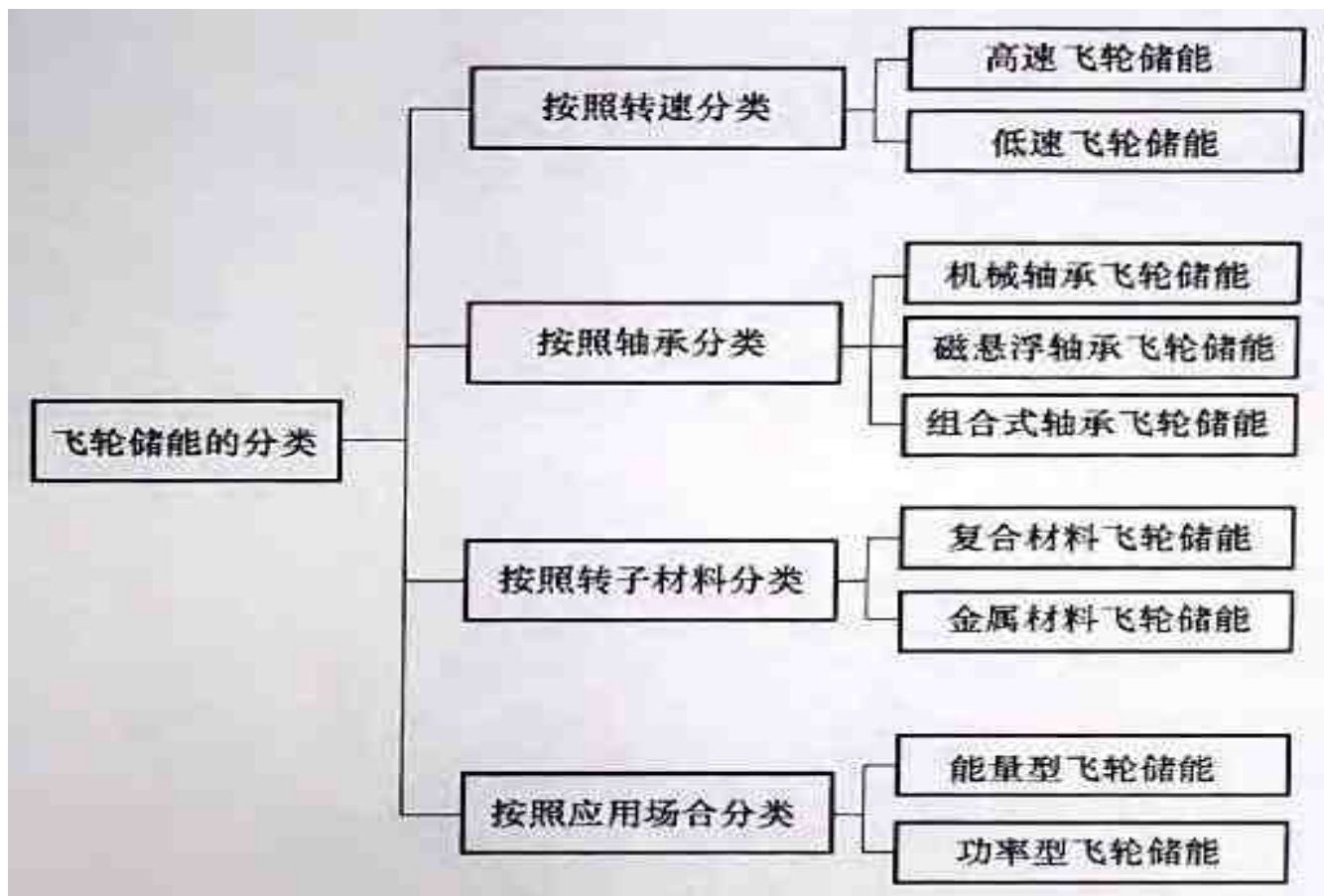
飞轮储能系统通过机械能与电能之间的能量转换实现对能量的存储和释放。

- 在储存能量时，由电机带动飞轮转子加速运转，将输入能量转化为机械能
- 在释放能量时，则飞轮转子减速使系统机械能减小，减小的这部分能量以向外供电的方式实现能量由机械能到动能的转变，进而完成能量的释放



7.1 飞轮储能

□ 飞轮储能的分类



7.1 飞轮储能

□ 飞轮储能的技术特点

◆ 瞬时功率大

飞轮储能的**瞬时功率较高**、**放电时间短**，因而在瞬时可以输出较大能量，在发射电磁炮和快速启动电动汽车等场景下可以利用飞轮储能的这一特点实现超短时加速。

◆ 运行损耗低

飞轮储能的能量**转换效率**可高达**90%**左右，有利于实现能量的**高效转换**和**更低的热损耗**。



7.1 飞轮储能

□ 飞轮储能的技术特点

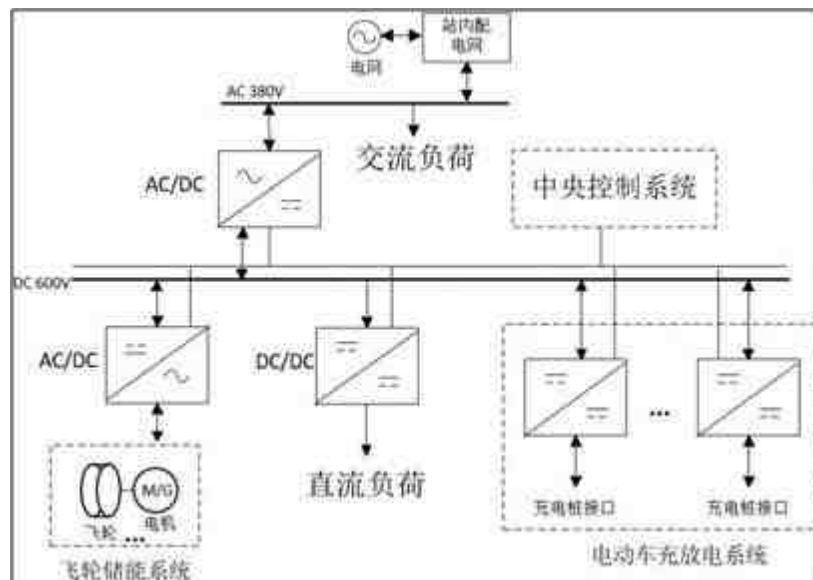
➤ 循环寿命长

飞轮储能的使用寿命主要取决于储能

系统中电子器件的寿命，一般可以达到**20年**，且**不会受到过充放电的影响**。

➤ 充电时间短

通过电机带动飞轮加速旋转可在**数分钟**内将飞轮电池**充满**。



7.1 飞轮储能

□ 飞轮储能的技术特点

➤ 对环境影响小

相比于化学电池，飞轮储能过程
不 涉及化学反应，对环境友好。

➤ 受温度影响小

对温度不敏感，运行较为稳定。

➤ 状态易于检测

飞轮储能的能量特性与机械运行
状 态具有直接相关性，可以通过转
速 等参数测量放电深度和剩余电量。



7.1 飞轮储能

□ 飞轮储能的基本构成

◆ 飞轮转子

飞轮转子是飞轮储能系统中**能量存储的载体**，通过**转速的变化**实现对机械能的存储和释放。

◆ 轴承系统

轴承的作用是**支承转子安全稳定旋转**，同时**减小**飞轮旋转过程中产生的**摩擦阻力**。

◆ 电机系统

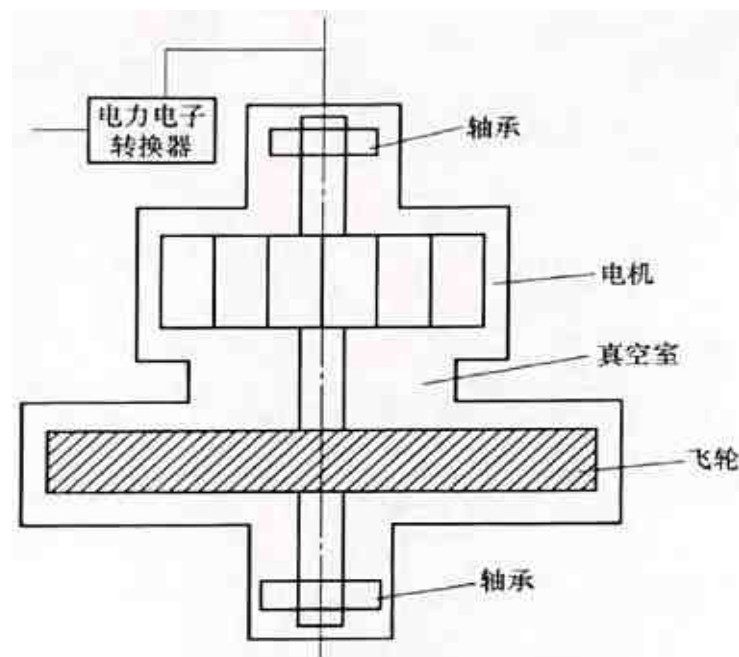
电机系统用于**协调**飞轮储能系统的**能量转换**。

◆ 电能变换器

电能变换器的作用是**转化系统输入的电能**，以保证电机需要的电压、电流制式与输入电能的制式一致。

◆ 真空室

真空室用于**维持**飞轮转子的**真空环境**，从而降低空气阻力带来的摩擦损耗，实现能量的**高效率**存储和释放，并且对飞轮装置起到**保护**作用。



7.1 飞轮储能

□ 飞轮储能中的关键技术

◆ 飞轮转子的设计

飞轮旋转时储存的能量E可用下式表示为：

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2$$



J 飞轮转动惯量(kg·km²)

ω 飞轮的旋转角速度(rad/s)

设飞轮储能的转子结构为**实心圆盘**，则转子储存的能量E可由下式计算：

$$E = \frac{1}{4} M r^2 \omega^2 = \frac{1}{4} M v^2$$



E 飞轮储能系统的储能量(**Vh**)

M 实心飞轮圆盘质量(kg)

r 圆盘旋转半径(m)

v 圆周线速度(m/s)

7.1 飞轮储能

例7-1： 已知某飞轮储能系统其储能量 E_{out} 为600Wh，转动惯量 $J = 2.19kgm^2$ ，放电深度 $\lambda = 1 - \frac{\omega_{min}^2}{\omega_{max}^2} = 1 - \left(\frac{1}{3}\right)^2$ ，其中 ω_{max} 、 ω_{min} 分别为飞轮最高和最低角速度，设电机及变换电路效率 η_g 为0.8，计算飞轮的最高转速及最大储能量。

解：飞轮转子储存能量总量为：

$$\Delta E = \frac{E_{out}}{\eta_g} = \frac{600}{0.8} = 750Wh$$

储存能量总量与角速度的关系为：

$$\Delta E = \frac{1}{2}J\omega_{max}^2$$

用放电深度可表示为：

$$\Delta E = \frac{1}{2}\lambda J\omega_{max}^2$$

由此可计算飞轮最高转速 n_{max} ：

$$\begin{aligned}\omega_{max} &= \sqrt{E_{out} \frac{2}{\eta_g J \lambda}} = \sqrt{600 \times \frac{2}{0.8 \times 2.19 \times \frac{1}{9}}} = \\ 1665.5rad/s &\quad n_{max} = \frac{60}{2\pi} \omega_{max} =\end{aligned}$$

故最大储能量 E_{max} 为：

$$E_{max} = \frac{1}{2}J\omega_{max}^2 = \frac{1}{2} \times 2.19 \times (1665.5/3600)^2 \times 3600 = 843.7Wh$$

7.1 飞轮储能

□ 飞轮储能系统中的关键技术

◆ 飞轮转子的设计

飞轮的转速决定了飞轮储能系统**可以存储的最大能量**，转子的最大转速**越高**，则其存储能量就**越大**。单位质量飞轮转子所能储存的最大能量（即储能密度） e 可由下式计算：

$$e = \frac{E}{m} = \frac{2.72 K_S \sigma}{\rho}$$



e 储能密度(Wh/kg)
 K_S 与飞轮结构相关的系数
 σ 飞轮材料的抗拉强度(Pa)
 ρ 飞轮材料的密度(kg/m^3)

7.1 飞轮储能

□ 飞轮储能系统中的关键技术

◆ 飞轮转子的设计

飞轮可达到的最大转速受到本身材料性能的限制，转速过高可能引起转子出现裂缝等问题从而造成安全事故，选择比强度(σ/ρ)高的材料可以提高飞轮转子的最高转速。

飞轮材料	σ (GPa)	ρ (kg/m^3)	e (W·h/kg)
铝合金	0.6	2800	32.6
高强度铝合金	1.3	2700	41.5
高强度钢	2.8	7800	56.8
E 玻璃纤维树脂	3.5	2540	231.9
S 玻璃纤维树脂	4.8	2520	320.6
碳纤维 T-300树脂	3.5	1780	218.8
碳纤维 T-700树脂	7	1780	662.0

7.1 飞轮储能

□ 飞轮储能系统中的关键技术

◆ 轴承系统的设计

轴承系统具有减小运行过程中的摩擦和支撑作用，对轴承系统的设计和选择是除飞轮转子材料之外，影响飞轮运行转速和飞轮储能系统能量转换效率的另一重要因素。

轴承系统主要分为两大类：

机械轴承

磁悬浮轴承

基于有无磁力控制下，可分为主动轴承和被动轴承；

伴随半导体、永磁体的发现，还可细分为永磁轴承、超导体磁轴承和电磁轴承。

7.1 飞轮储能

□ 飞轮储能系统中的关键技术

◆ 轴承系统的设计

➤ 机械轴承

在飞轮储能系统中，主要的机械轴承为滚动和滑动轴承，其在系统中具有保护作用，而其他材料的轴承如陶瓷轴承则用于一些特殊的系统中。

- ✓ 优点：机械轴承的结构紧凑、易于安装和拆卸，由于具有适于规模化生产的标准尺寸，维修也较为方便。
- ✓ 缺点：机械轴承在运行过程中摩擦力大，因而也带来了较大的运行损耗，当用于高速飞轮储能系统中时寿命折损问题较为突出。



7.1 飞轮储能

□ 飞轮储能系统中的关键技术

◆ 轴承系统的设计

➤ 磁悬浮轴承-被动磁轴承

在磁悬浮轴承中，**没有磁力控制**的一类轴承被称为被动磁轴承，其主要**依靠磁场本身实现悬浮**，不能实现对磁场强弱的调节。被动磁轴承包括**永磁轴承**和**超导磁轴承**两种形式。。

- ✓ 永磁轴承：永磁轴承利用**永磁体同性相互排斥、异性相互吸引的原理**实现定、转子之间的悬浮。
- ✓ 超导磁轴承：通过**超导电流**在超导体内部产生的与外部磁场大小相等、方向相反的感应磁场与磁体的磁场相互抵消，使超导体**所受磁力的合力为零**，因而能够稳定在悬浮状态



7.1 飞轮储能

□ 飞轮储能系统中的关键技术

◆ 轴承系统的设计

➤ 磁悬浮轴承-主动磁轴承

主动磁轴承又被称为电磁轴承，其主要原理是 **利用电流控制磁场的大小**进而实现对轴承的稳定悬浮控制。

改变电磁铁中的电流可以对电磁铁产生的电磁力大小进行控制，同时利用**传感器**实时监控轴承的位置变化情况；通过引入**闭环负反馈控制**，将观测到的位置和电流信号传入控制系统中，实现对输入电流大小的及时调整，直至轴承与转轴之间能够稳定悬浮为止。



7.1 飞轮储能

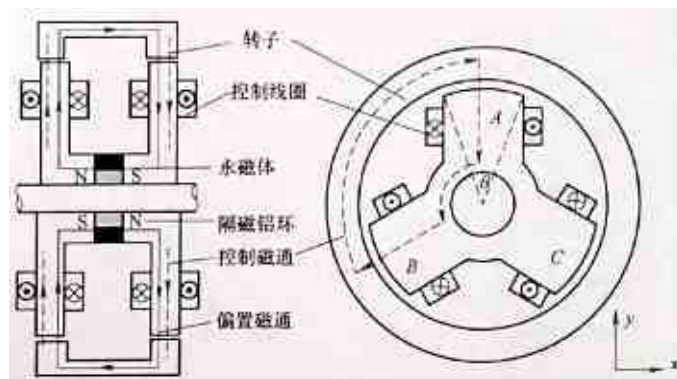
□ 飞轮储能系统中的关键技术

◆ 轴承系统的设计

➤ 组合式轴承

为进一步实现各种轴承系统的**优势互补**，组合式轴承系统也应运而生，通过采用**组合轴承**的方式以达到机械轴承和磁悬浮轴承**优势互补**的效果。

在组合中可以依据轴承的特点和实际工程需要，将其中一种轴承作为**主轴承**、而另一种作为**辅助轴承**，也可以分别充当**轴向**和**径向**轴承的角色，从而兼顾两者的优势。



7.1 飞轮储能

□ 飞轮储能中的关键技术

◆ 电机系统的设计

电机系统具有**电动机**和**发电机**的双重属性，是完成飞轮储能充电和放电过程中不可或缺的关键装置。在**充电模式**下，电动机带动飞轮转轴不断加速运转，直至达到最大转速；在**放电模式**下，飞轮转速随着发电机对外输出电能而不断降低。

在电机的设计或选择中需考虑以下因素：

- ✓ **电机成本**
- ✓ **空载损耗**
- ✓ **输出特性**
- ✓ **转换效率**
- ✓ **调速范围**



7.1 飞轮储能

□ 飞轮储能系统中的关键技术

◆ 电机系统的设计

目前飞轮储能系统中的主流电机包括：● 异步电机 ● 磁阻电机 ● 永磁电机

项目	异步电机	磁阻电机	永磁电机
功率	中大	中小	中小
比功率	0.7	0.7	12
转子损耗	铜、铁	铁	无
旋转损耗	可去磁消除	可去磁消除	不可消除
效率%	93	93	95
控制	矢量	同步、矢量、开关、DSP	正弦、矢量、梯形、DSP
尺寸 W/L	2	3	2
转矩脉动	中	高	中
速度	中	高	低
失磁	无	无	有
费用	低	低	高

7.1 飞轮储能

□ 飞轮储能系统中的关键技术

◆ 电能变换器控制技术

电能变换器可辅助电机实现能量在不同形式之间相互转换

- 将电能转化为机械能：对飞轮储能系统输入能量，电力电子转换器对输入的电流进行调整，通过AC-DC转换驱动电机使飞轮的转速增加，并确保飞轮安全和可靠运行；
- 将能量以机械能存储：飞轮以恒定不变的较高转速运行以储存动能，此阶段为飞轮 储能的能量保持模式。
- 将机械能转化为电能：飞轮储能系统向外释放能量，当能量通过电网供给负载时，需要通过电力电子转换器将释放的电能进行调整，使其与电网电压保持同步后回馈至电网进而供给负载。



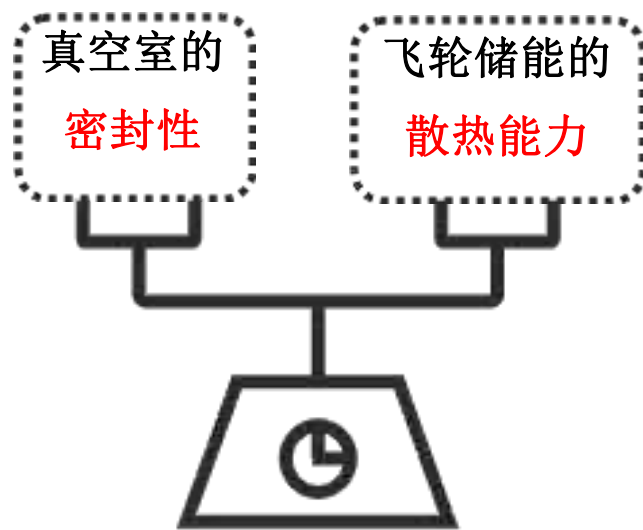
7.1 飞轮储能

□ 飞轮储能系统中的关键技术

◆ 真空室与冷却系统

在飞轮高速旋转的过程中，能量的损耗不仅包括**机械摩擦损耗**，还包括运行中的**空气阻力摩擦损耗**。为了尽可能减小空气阻力带来的风阻，通常需要将飞轮放入真空室内从而降低风阻，以保证设备的安全运行和降低事故的发生。

目前面临的技术问题：如何在**降低风阻**和维持较高的**散热性能**之间达到**平衡**？



7.1 飞轮储能

□ 飞轮储能的应用

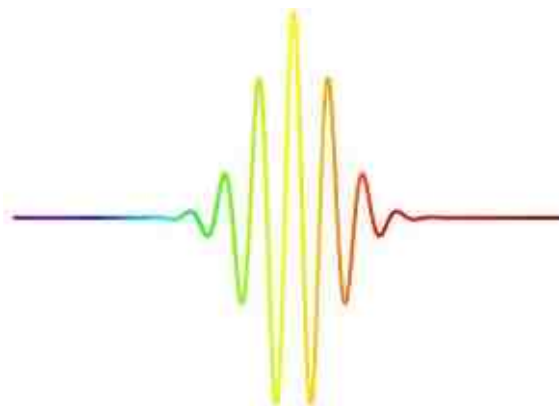
◆ 不间断高质量供电

若电力因故障中断持续**5秒**左右，传统的备用柴油发电机需要**10秒**左右才能为电力负荷供电，在此阶段可由**飞轮储能不间断电源系统**为负荷提供数十秒的**高质量短时电力保障**。



◆ 脉冲功率供电

在对核聚变能的研究中，需要向磁场线圈供电以产生和维持磁约束实验环境，此实验对电源的功率要求较高，采用**大型飞轮储能机组**可实现**大容量、短时**的供电。



7.1 飞轮储能

□ 飞轮储能的应用

◆ 机车能量再生利用

在车辆启动时，飞轮储能输出的机械能转化为电能后，再通过供电实现电能到车辆动能的转化；在制动时通过再生制动将车辆动能转换成电能，并通过带动电机转动提高飞轮速度从而实现飞轮系统的储能，达到能量回收的目的。



◆ 车辆动力电池

采用飞轮储能系统替代传统内燃机作为车辆动力电池的想法，源于人们对能源日益短缺和环境污染问题的重视。



7.1 飞轮储能

□ 飞轮储能的应用

◆ 电网辅助调频服务

电网的电力供应和需求需要在任意时刻达到平衡，否则将引起电网电压频率出现波动，影响用电设备和电力设施的安全稳定运行。

常规的电网频率调节方式如抽水蓄能电站、火电站等功率调整方式无法实现对电网频率快速波动的及时响应。飞轮储能则具有充放电时间极快、功率密度大等优势，可以满足电网的调频需求。



7.1 飞轮储能

□ 飞轮储能的发展前景

◆ 飞轮转子的性能改进

未来提高飞轮储能运行效率的关键方向在于通过对复合材料的选择、加工以及结构设计等一系列飞轮转子制造流程进行改进。

◆ 高速电机的研究

未来高速电机的研究在于如何在提高电机转速的同时兼顾电机的散热、强度以及损耗性能。

◆ 新型磁轴承的发展

对于大容量飞轮储能的轴承系统，如何在减少损耗以提高运行效率的同时降低运行成本是主要的发展方向之一。

◆ 模块化的运行技术

在模块化运行技术中，如何提升飞轮储能系统的功率和放电时间是未来飞轮储能系统大型化的主要发展方向之一。

7.2 超导储能

□ 超导储能的基本概念

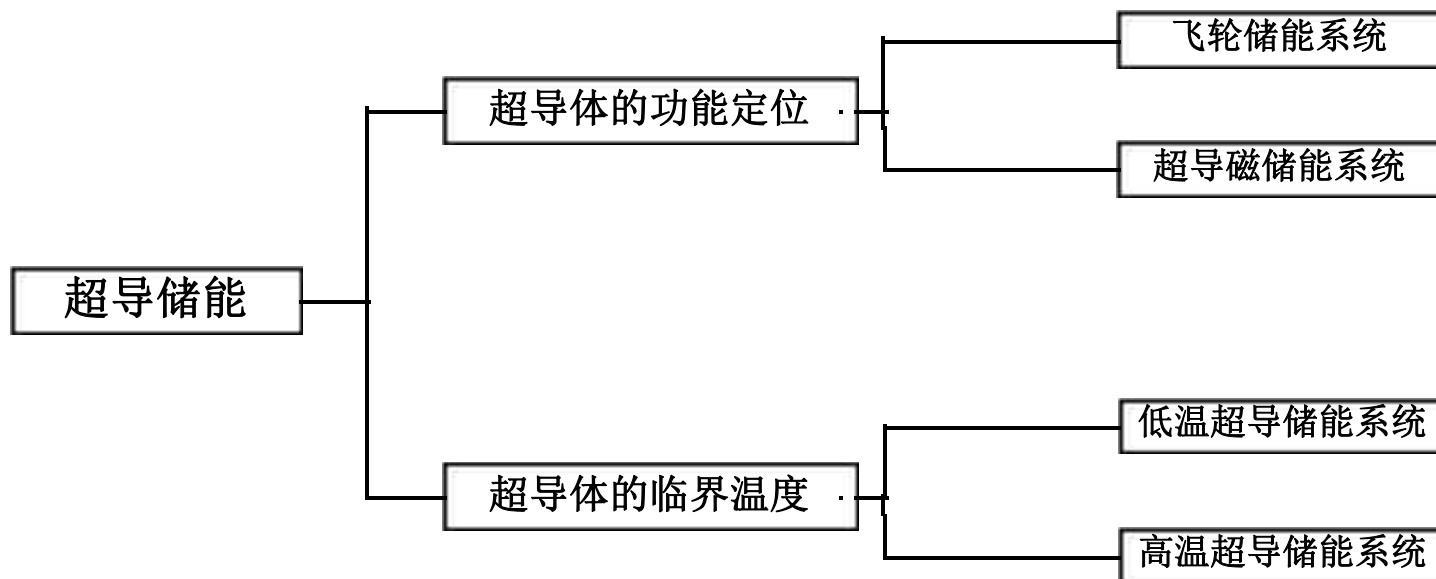
超导储能系统，是通过**超导体**中的**电磁能**和**电能**之间的能量转换来实现**能量存储和释放**的储能装置，主要可以分为**储能**和**释能**两个基本工作过程：

- **储能**时，将电网交流电转换为直流电存储到超导线圈中，电能在该过程中转化为超导线圈的电磁能。
- **释能**时，超导储能系统将存储的电能经控制变流器传输至负载，超导线圈中的电磁能在该过程中重新转化为电能。



7.2 超导储能

□ 超导储能的分类



7.2 超导储能

□ 超导储能的特点

◆ 功率密度大

用于储能的超导线圈的工作电流可达数百安甚至上千安，其功率密度非常高。

◆ 响应速度快

电磁能到电能的转换过程非常便捷，响应速度可达ms级。

◆ 使用寿命长

超导储能系统在运行过程中不涉及电化学反应，除了真空和制冷系统外没有机械接触带来的损耗，因而装置使用寿命长，循环利用次数高。



7.2 超导储能

□ 超导储能的特点

◆ 储能效率高

导线圈运行在超导状态时电阻为零，因而不存在导体发热引起的热损耗，所以能在长时间内无损耗地储存能量，其储能效率超过90%。

◆ 环境依赖小

相比于抽水蓄能等储能技术，超导储能对安装和使用环境的要求较低，且具有对环境影响小、便于维护等优势。

◆ 运行控制灵活

由于超导储能可以独立地在大范围内选取其储能与功率调制系统的容量，因此可将其建成大功率和大能量系统。



7.2 超导储能

□ 超导储能工作原理

◆ 工作原理

超导储能装置工作时，需先在超导线圈内储存一定的能量，再通过**控制变流器**实现与外部的功率交换。超导储能系统中的超导线圈在**超导态电阻为零**，通入直流电流时不会产生焦耳热损耗。因此，为了提高能量转化效率，超导储能采用**直流供电**方式。

◆ 超导能量

超导线圈是实现超导储能系统能量存储的关键环节，设其储存的能量为 E ，则：

$$E = \frac{1}{2}LI^2$$



E 电磁能(J)

L 超导线圈电感(H)

I 超导线圈电流(A)

7.2 超导储能

□ 超导储能构成

➤ 超导线圈

超导线圈因其通入电流后会形成磁场而又被称作

超导磁体，是超导储能系统中的核心部件。

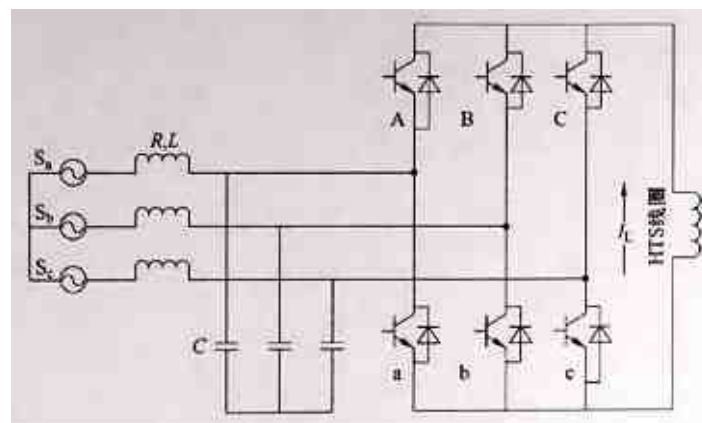
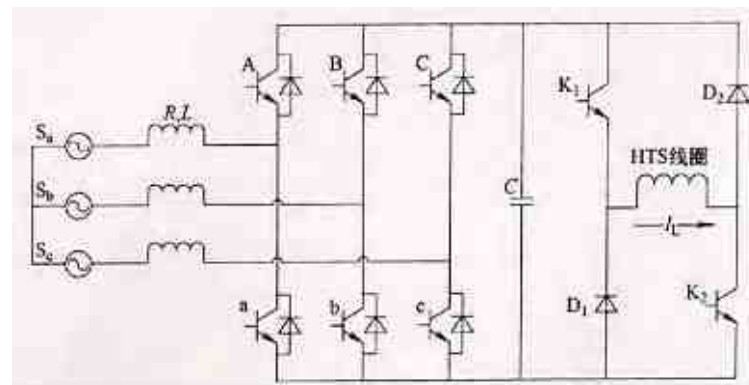
超导线圈电流密度大、几乎无损耗，因而由超导线

圈构成的超导储能系统的储能密度在 $10^8\text{J}/\text{m}^3$ 量级。

➤ 变流器

超导磁储能所采用的**AC/DC变流器**实现了超导线圈

和外部交流电网之间的连接，是超导储能系统与电网之间功率交换的桥梁。变流器采用由电力电子器件组成的开关电路，从电路拓扑结构角度来看，主要包括**电压型**和**电流型**两大类。



7.2 超导储能

□ 超导储能构成

◆ 失超保护系统

超导体的运行状态受到**电流**、**磁场**及**温度**等因素的影响，一旦不能满足超导条件，将会失去超导状态，即发生**失超问题**。发生失超的导体部位会存在**电阻特性**。在有较大电流流过时，由于导体的**焦耳热效应**会使得局部温度过高。当相邻部位的温度也超过超导材料的临界温度时，就会导致整个导体都由于温度过高而失超。

（1）失超原因：由于**超导材料具有各向异性**，使得超导材料的局部性能可能存在缺陷，如：**临界温度较高等**。除了超导材料本身的缺陷，系统**线路中**的**线路干扰和导线受磁场力作用下的运动**等一些外部干扰也会引起失超的发生。此外，超导线圈中的**电流突然升高**时可能会破坏维持超导的电流条件，从而发生失超现象。

7.2 超导储能

□ 超导储能构成

◆ 失超保护系统

(2) 失超检测：通过对系统中的环境变化如**温度、压力等因素**进行测量，
可 以检测失超是否发生。目前的失超检测方法主要有以下几种：

- A. **温度测量**：超导体发生失超时，零阻态会转变为一般状态，由于电流的焦耳热效应导致温度升高。因此通过监测超导体各部位是否有明显的局部温度升高现象，可判断是否发生失超。
- B. **气压测量**：超导体发生失超时超导线圈会发热，气体吸热后体积膨胀使得冷却系统中的气压增大，因此通过压力传感器检测压力的变化可判断是否 发生失超。

7.2 超导储能

□ 超导储能构成

◆ 失超保护系统

- C. 电压测量：**超导体发生失超时，导体线圈具有电阻，通过测量线圈电压的变化可作为是否发生失超的判断依据。该方法与温度测量法类似，需在各个线圈上设置传感器，检测成本相应偏高。
- D. 桥式电路测量：**在超导磁体的中心安装一个抽头，与两个电阻和一个电流计组成一个桥式电路。失超发生时，电流计偏转。桥式电路检测法安装和使用较简单，不需要电压传感器。需要指出的是桥式电路的灵敏度非常高，易受噪声信号干扰。
- E. 超声波信号测量：**用超声波信号对冷却系统的输入输出状态进行检测，通过其传递函数的变化情况判断失超。

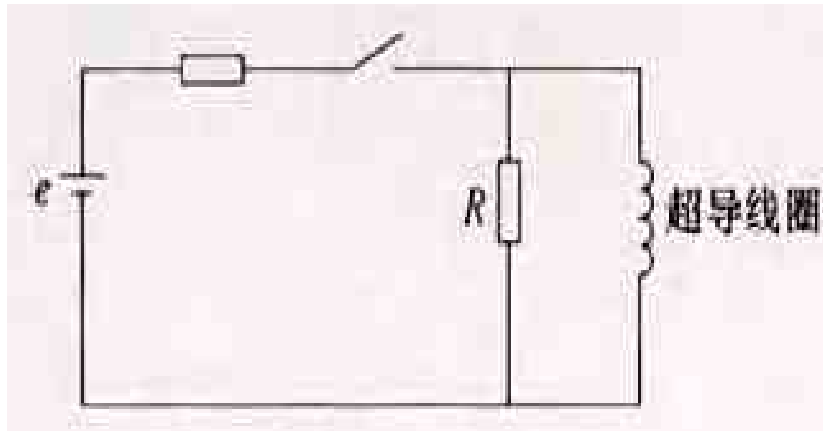
7.2 超导储能

□ 超导储能构成

◆ 失超保护系统

(3) 失超保护：对超导磁体采取有效的保护措施以保证设备安全可靠运行，保护的主要目的是转移失超磁体中的电流从而避免焦耳热在线路上的释放。主要保护手段有如下四种。

A. 并联外部电阻保护：将超导体与电阻 R 并联，正常状态下超导体的电阻为零，相当于电阻 R 被短路；当超导体发生失超时，将开关断开，由线圈与电阻 R 构成闭合回路，从而释放电能，电阻 R 越大其放电速度也越快，避免了超导体本身温度过高。

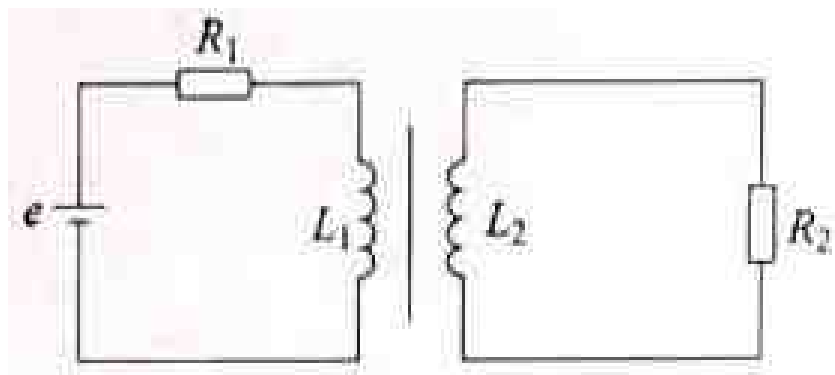


7.2 超导储能

□ 超导储能构成

◆ 失超保护系统

B. 变压器保护：由超导线圈作为初级线圈构成变压器。在正常状态下，次级线圈中无感应电流。当失超发生时由于超导线圈具有电阻，原边回路中电流减小。电流减小导致磁场变化，进而在次级线圈中产生感应电流，电阻 R_2 用于能量的消耗，从而实现对能量的转移消耗。

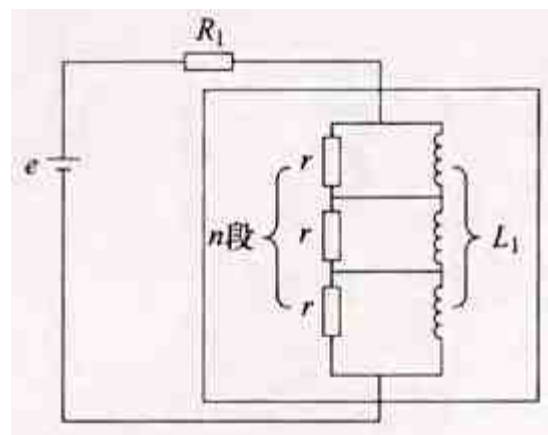


7.2 超导储能

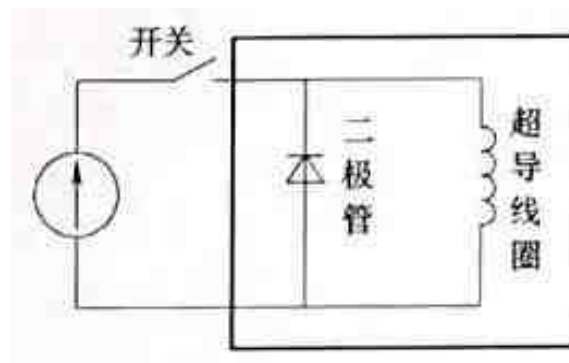
□ 超导储能构成

◆ 失超保护系统

C. 内部分段并联电阻保护：引入一系列电阻与超导线圈进行分区并联，当其中的一部分线圈失超时，与该段并联的电阻会释放能量从而使相邻段的超导线圈也发生失超，从而将能量释放。



D. 并联二极管保护：当失超发生时，二极管导通，超导线圈通过二极管续流，能量在线圈内部释放。



7.2 超导储能

□ 超导储能构成

◆ 冷却系统

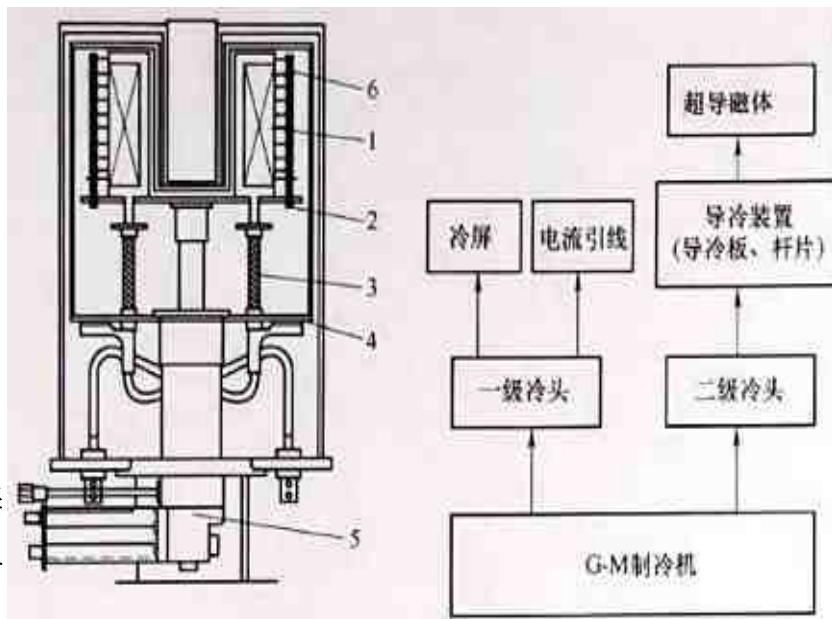
为了保证超导体**稳定维持在超导态**，无论是低温超导材料还是高温超导材料，都需要将其置于低温冷却环境中。

超导磁体冷却流程

制冷机的一级冷头对电流引线和冷屏实施冷却，二级冷头则通过导冷板、导冷杆和导冷片对磁体进行传导冷却。

超导磁体冷却途径

液体冷却和直接(传导)冷却。液体冷却操作不够简便、需花费较高成本。直接冷却较为方便快捷，但是需要通过消耗额外能量维持制冷机的正常运转。



7.2 超导储能

□ 超导储能构成

◆ 控制系统

超导磁储能系统的突出优势在于对**功率快速交换**的实现，同时还可以实现**四象限范围内独立运行功率交换**。因此，控制系统需保证其控制器设计与控制策略使得超导磁储能系统平稳接入电网，并根据需求改善电力系统性能，从而最大程度地发挥超导储能系统的突出优势。

目前的控制策略主要可分为以下几类：

- 1 **基于物理模型的控制方式**。例如经典**PID**、变参数**PID**、局部线性化、反馈线性化、变结构控制和自适应非线性控制等。
- 2 **综合控制方式**。包括模糊控制、人工神经网络控制、遗传算法和专家控制系统等。

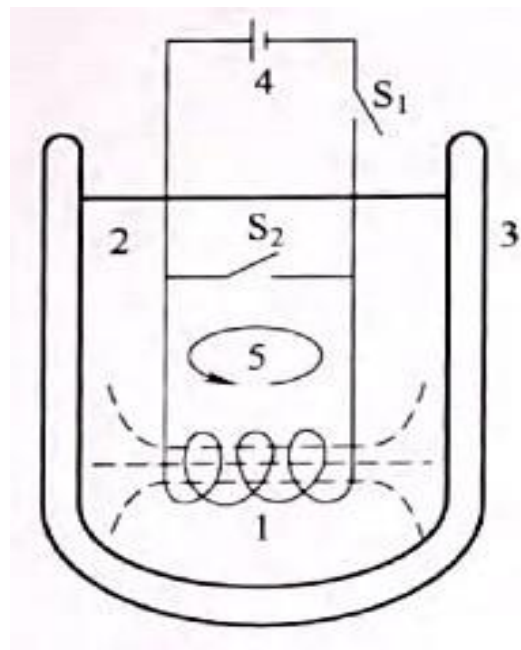
7.2 超导储能

□ 超导储能工作流程

1) **充电模式**：开关 S_1 闭合、 S_2 断开时，电源与超导线圈通过 S_1 形成闭合回路，从而为线圈充电，此时电能转化为电磁能；

2) **能量保持模式**：开关 S_1 断开、 S_2 闭合时，超导线圈中的电流流经 S_2 后返回线圈，从而形成电流无衰减的储能保持状态；

3) **放电模式**：开关 S_2 断开，通过外接逆变器与负载等，从而实现对外放电，此时电磁能转化为电能。



7.2 超导储能

□ 超导储能的应用

◆ 平滑可再生能源出力

超导储能具有**响应速度快**、**功率密度大**的优势，可作为可再生能源与电网之间的“**能量缓冲器**”，在**提高能量利用率**的同时**平滑可再生能源的出力**。



◆ 提高电力系统稳定性

超导储能具有**快速响应**的优势，可在由可再生能源并网引起系统短时功率不平衡的情况下弥补不平衡功率，亦可**维持微电网的暂态功率平衡**。



7.2 超导储能

□ 超导储能的发展前景

◆ 大容量高温超导磁体

将多个高温超导磁体进行并联，可实现电流高达千安级别的大容量高温超导磁体技术，由于材料差异可能导致电流分配不均，甚至发生失超，因此需重点考虑高温超导材料选择。

◆ 超导磁储能低温高压绝缘

超导磁储能在充放电的过程中会产生交流损耗，温度升高可能导致制冷剂中产生气泡。使得高压产生的强电场下会使系统的绝缘结构发生变化，从而对绝缘性能产生重要影响。

◆ 超导储能在线监测与控制

临界失超状态下的超导磁体所发出的失超电压信号比正常状态下较为微弱，如何将微弱的信号从高频高压方波脉冲信号中提取出来也成为失超预警与保护的关键。

◆ 高效低温制冷系统

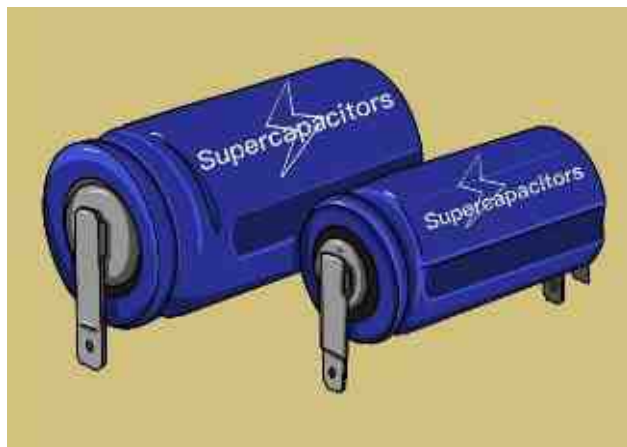
超导磁体必须工作在低温状态下才能保持超导状态，高效率的低温杜瓦和制冷机等冷却设备与降低低温制冷系统的损耗是维持低温环境的关键。

7.3 超级电容

□ 超级电容概述

超级电容器又名**电化学电容器**，是一种主要依靠**双电层和氧化还原赝电** **容电荷储存电能**的新型储能装置。

与传统的化学电源不同，超级电容器是一种介于传统电容器和充电电池之间的电源，既具有电容器**快速充放电**的特性，又具有电池的**储能**特性。



7.3 超级电容

□ 超级电容的基本概念

在众多的储能器件中，超级电容器具有优良的**脉冲充放电性能**，功率密度高于蓄电池，能量密度又高于传统电容。此外，超级电容器**充放电效率高**（大于**90%**），**寿命超长**（百万次以上），**适用温度范围宽**（**-40~70°C**）。超级电容器在电力、工业、交通等领域，包括现今广泛应用的移动电子设备、电力系统的元器件和新能源汽车下一代能量储存系统等方面，取得了不少商业化的应用。

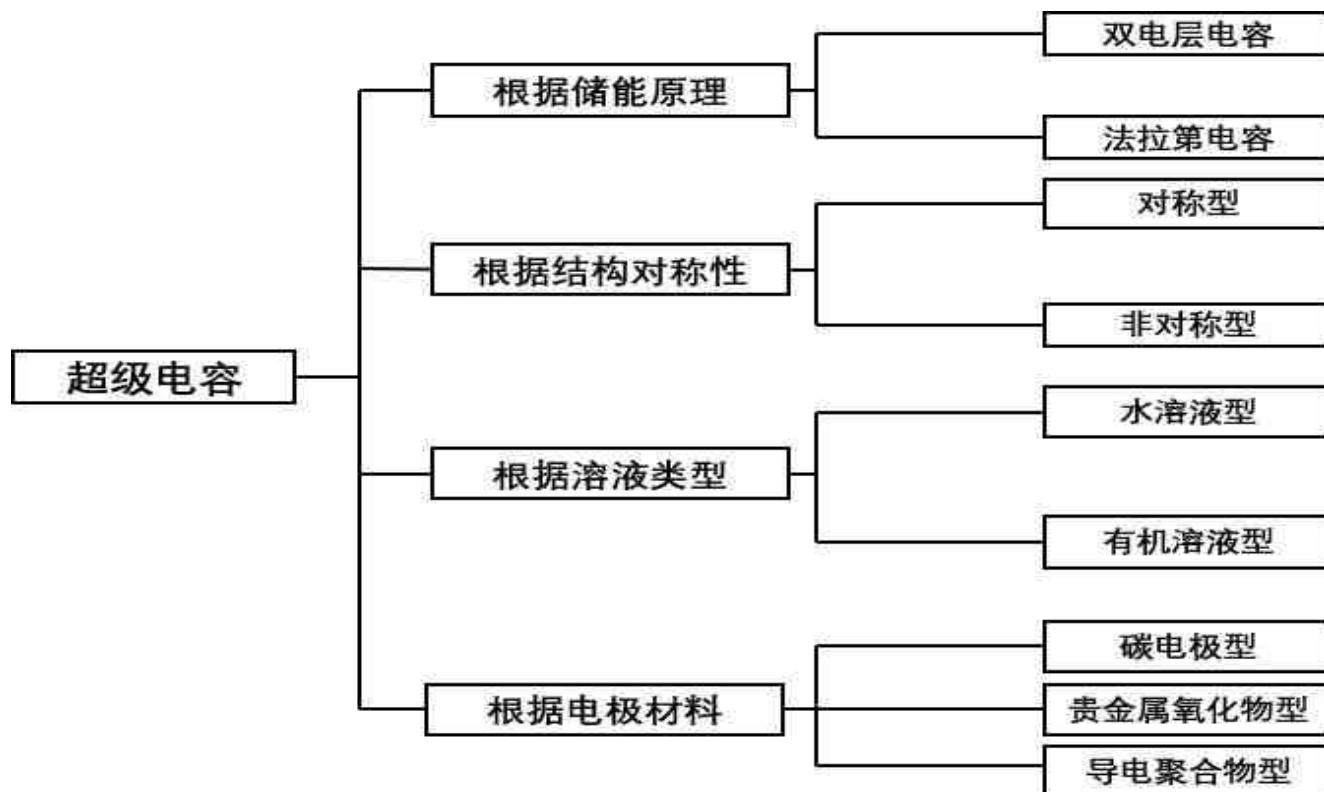
充放电效率高

使用寿命长

适用温度范围宽

7.3 超级电容

□ 超级电容的分类



7.3 超级电容

□ 超级电容的特点

◆ 功率密度高

瞬时放电量非常大，功率密度最高可达超
 10^4W/kg 量级水平；

◆ 充电用时短

适用于**短时充电**，超级电容的充电时间在
秒到分钟级别；

◆ 循环寿命长

不涉及化学反应过程、材料的**损耗较低**，
因此其充放电循环最多可达**百万次**；



7.3 超级电容

□ 超级电容的特点

◆ 环境适应性强

受到温度的影响较少，温度**适应范围较宽**。

◆ 环境污染小

不涉及重金属等对环境有害的化学原料，对环境造成的**污染很小**，是一种绿色环保的储能装置。

◆ 维护成本低

深度充放电次数较高，在标准范围内可**以达到1~50万次**充电。



7.3 超级电容

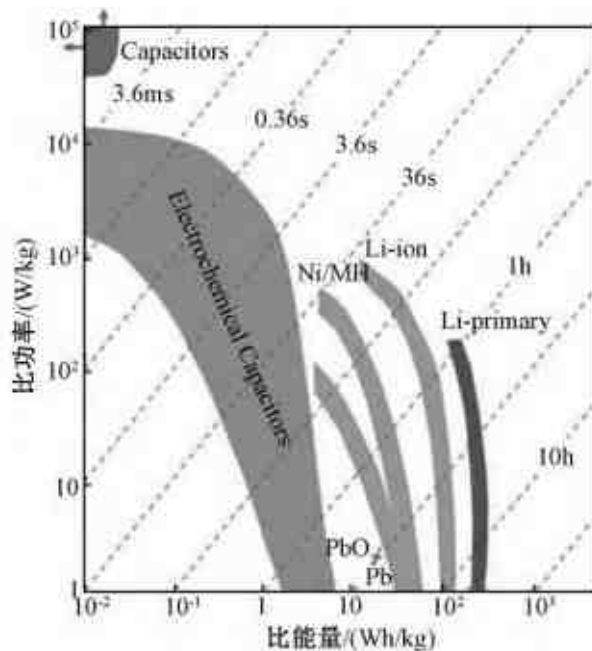
□ 超级电容的特点

◆ 能量密度低

在储存能量相同的情况下，超级电容的能量密度仅为铅酸电池等的**20%**左右，而超级电容在**体积**、**质量**和**占地面积**方面都比蓄电池大很多，因而带来了更大的运行成本。

◆ 端电压波动性强

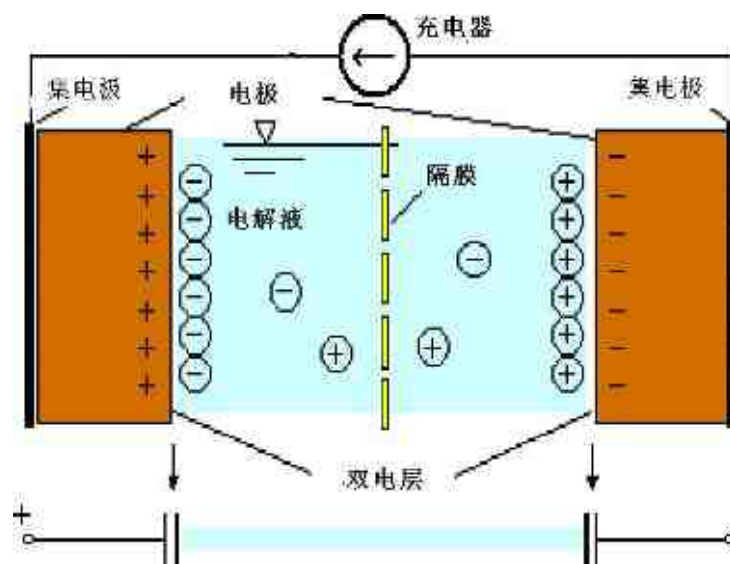
在充放电过程中超级电容**端电压**会不断变化，需要额外配置电力电子器件保证输出电压的稳定。



7.3 超级电容

□ 双电层电容器的工作原理

双电层电容器通过电极与电解液形成的界面双电层来收藏电荷从而实现能量的储存。在外加电场作用下，电极之间形成由正极指向负极的电势差，电解液中的阴阳离子在电场力作用下向具有相反极性的电极移动。当正极聚集大量阴离子、负极板聚集大量阳离子时，在电极表面与电解液之间形成了两个集电层



7.3 超级电容

□ 双电层电容器的工作原理

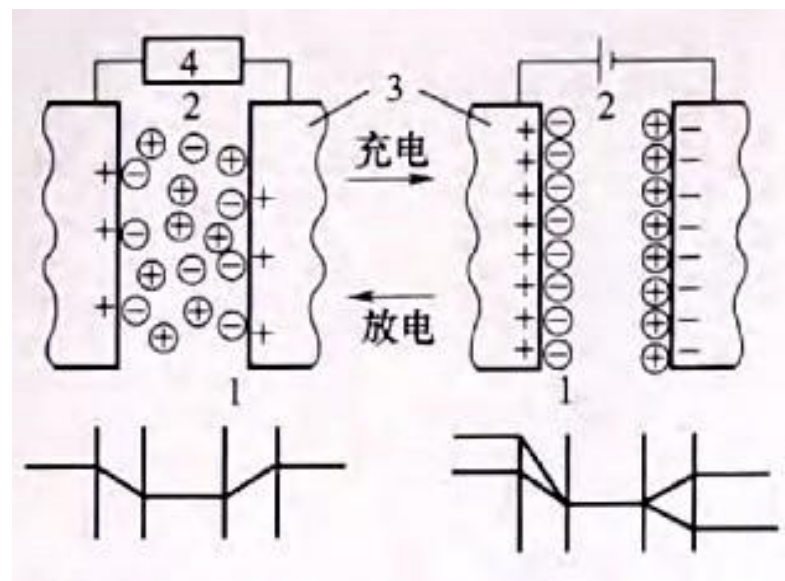
◆ 充电过程

正极电势提高而负极电势降低，界面上的电荷也相应地增加或减少。撤掉外电场后，电荷受到极板的吸引力，因此电解液中的阴阳离子不会离开双电层，从而可以维持两极板间电势差的稳定，实现

电容的充电过程。

◆ 放电过程

在双电层电容器放电过程中，极板上的电子经过外部负载电路回到正极实现电荷中和，从而破坏了原来的双电层结构，使得极板电势差逐渐降低。此时，阴阳离子也重新回到电解液中，实现电容的放电过程，放电持续至电势差降为零即结束。



7.3 超级电容

□ 双电层电容器的工作原理

提高电极比表面积或者**减小电层厚度**可以显著提升超级电容器的电容值。超级电容器多采用活性炭材料制作成多孔碳电极，由于活性炭材料比表面积较大（比表面积 S 不小于 $2000\text{m}^2/\text{g}$ ），而且由于电解液与电极之间的距离相当接近，因此这种**双电层结构**的超级电容器的比容量可以提高到一般电容器电容值的100倍以上。

超级电容器的比电容为 C ($\text{F} \cdot \text{g}^{-1}$) 可表示为：

$$C = \frac{\varepsilon S}{\delta}$$



ε 电解液的介电常数(F/m)

δ 双电层厚度(m)

S 电极比表面积($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)

7.3 超级电容

例7-2：一个双电层电容器相对介电常数为4，电极有效比表面积为3000m²/g，等效距离为5 × 10⁻¹⁰m，计算其电容值。若其两端电压为2.7V，计算该超级电容储存的能量。

解： 由电容计算公式得：

$$C = \frac{\epsilon S}{\delta} = \frac{4 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 3000}{5 \times 10^{-10}} F = 212.4F$$

可见其电容值远高于传统物理电容器

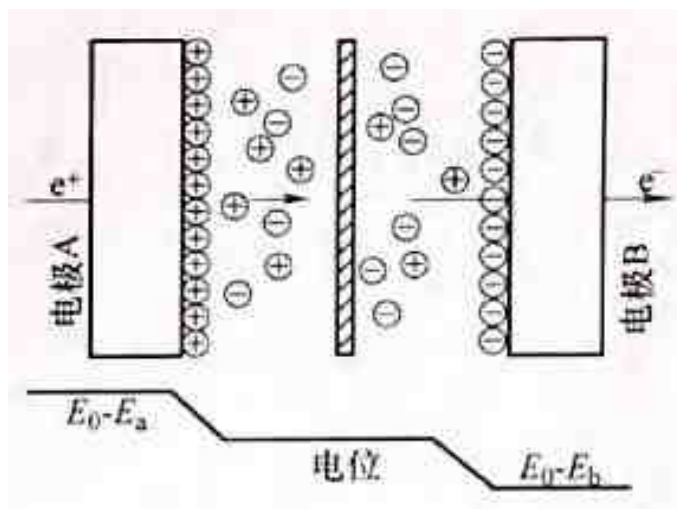
该超级电容储存能量为：

$$E = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2} \times 212.4 \times 2.7^2 J = 774.2J$$

7.3 超级电容

□ 法拉第电容器的工作原理

法拉第电容器又被称为**赝电容器**。不同于双电层电容，法拉第电容通过化学反应实现储能。充电时，对电容器施加外电压，电解液中的离子迁移到电极表面，并**通过氧化还原反应进入**活性物质中，从而实现电荷的储存；放电时，活性物质体相中的离子又**通过氧化还原的逆反应进行脱嵌**而回到电解液中。同时，储存的电荷得到释放，在外电路形成电流回路



7.3 超级电容

□ 超级电容的应用

◆ 电气化交通领域

目前超级电容在轨道交通领域中的应用相对较多，包括**列车再生制动能量回收储能系统**、**内燃机辅助启动**、**混合动力动车机组**等。



◆ 新能源电力系统领域

超级电容作为一种储能元件，同样也可用于**应对风电、光伏等可再生能源出力不确定性问题**。超级电容具有**短时响应快、瞬时功率大**的优势，在可再生能源出力出现波动时，通过对超级电容快速充放电将电力系统的电压频率控制在标准之上，**防止设备因此造成损毁或进一步扩大电网故障范围**。



7.3 超级电容

□ 超级电容的发展前景

◆ 新型高性能电极材料

双电层电容

双电层电容所用的电极材料**电导率高、成本低廉、功率密度高**，如何有效克服其**比电容小、能量密度低、可选择空间较小**等不足，是提高双电层电容发展潜力的未来方向。

赝电容

赝电容所用的电极材料**能量密度高**，如何有效克服其**可选择空间较小、材料利用率低低、稳定性差**等不足，是未来提高赝电容发展潜力的方向。

◆ 特殊功能超级电容器

混合型超级电容

混合型超级电容常以**赝电容**电极材料为**正极**，**双电层**材料为**负极**，结合了两者的储能机理，由于其具有**较高的比电容和能量密度**，成为近年来研究的重点。

固态超级电容

固态超级电容具有**环境友好、稳定性高、轻便**等优势，并且具有**柔性、可穿戴性**，拓宽了超级电容的应用范围。

总结与展望

飞轮储能：

- 飞轮储能系统储能时，通过电动机带动飞轮旋转，将电能转化为动能进行快速存储，并在需要的时候将动能转换为电能实现能量释放；
- 飞轮储能具有能量密度大、充电时间短等优点；
- 飞轮储能装置由飞轮转子、轴承系统、电机系统、电能变换器以及真空冷却系统构成；
- 飞轮储能可以用于不间断供电UPS系统、脉冲功率电源等领域。

总结与展望

超导储能：

- 超导储能系统利用超导线圈通入电流转化为电磁能的形式存储能量，在需要时可以通过对开关的控制实现能量向外输出；
- 超导储能具有储能效率极高、储能密度高等优点，同时也存在储能材料价格较高的缺点；
- 超导储能装置由超导线圈、失超保护、冷却系统、变流器、控制系统等组成；
- 超导储能系统在电力系统中具有稳定系统频率和电压的作用。

总结与展望

超级电容：

- 超级电容是一种介于传统电容器与电池之间、具有特殊性能的储能装置，通过电极与电解液形成的界面双电层来收藏电荷从而实现能量的储存；
- 超级电容在充放电效率、功率密度、循环使用寿命等方面则具有非常优异的性能；
- 超级电容按照储能原理分为双电层电容器和法拉第电容；
- 超级电容可应用于瞬间大功率供给、车辆再生制动能量回收、汽车优化控制、新能源电力系统及电网的电能质量改善等多领域多环节中。

第八章 储能电站运行控制

- 储能电站运行概述
- 储能电站的运行控制方式
- 储能电站运行示范工程
- 储能典型应用
- 总结与展望

8.1 储能电站运行概述

□ 电池储能集成技术

◆ 电池成组技术

储能电池单体是组成大规模电池储能系统的基本单元。电池成组技术将电池单体通过成组方式组合成比电池单体能量等级更高的电池模组，是大容量储能系统的核心技术之一。

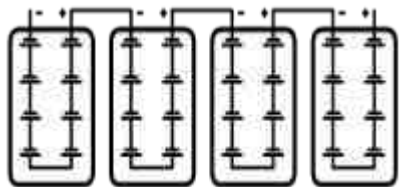


电池单体

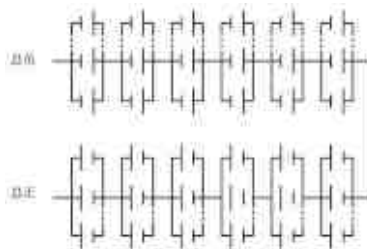


电池模组

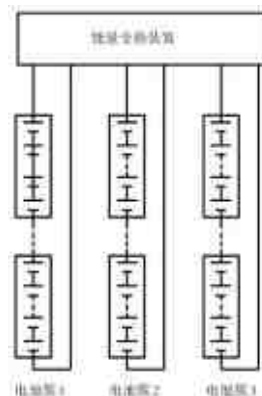
储能电池模组的成组方式主要有三种：直接串联、先串后并和先并后串。



串联方式成组



先串后并方式成组

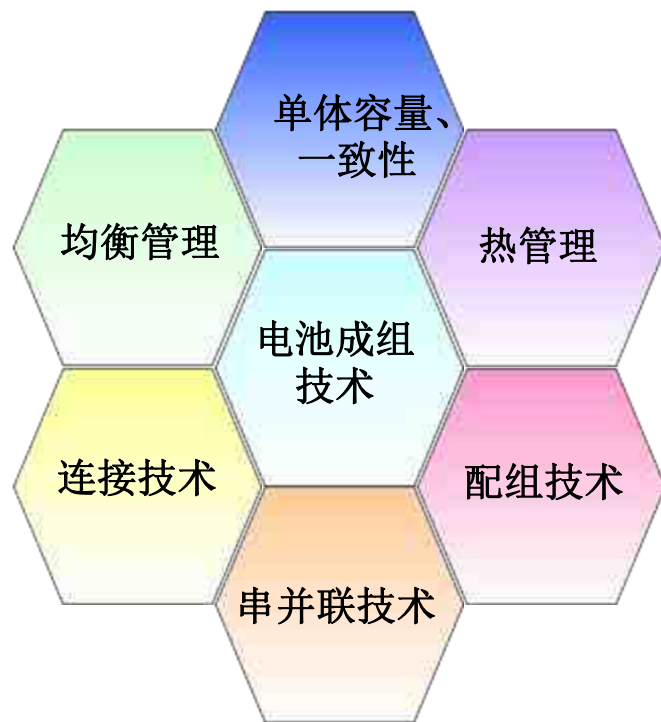


先并后串方式成组

8.1 储能电站运行概述

◆ 电池成组技术

- ◆ 电池成组技术与电池**均衡管理**、**单体容量及一致性**、**热管理**、**连接技术**、**配组**以及**串并联技术**等相关。
- ◆ 主动式电池组均衡技术需要考虑高精度 低成本的电池状态监测、大电流均衡电路的稳定性、快速在线均衡控制策略；
- ◆ 电池热管理需要考虑电池及电池模块热效应模型的建立、电池箱温度场建模及 仿真模拟分析、电池箱温场控制系统设计 及构建。

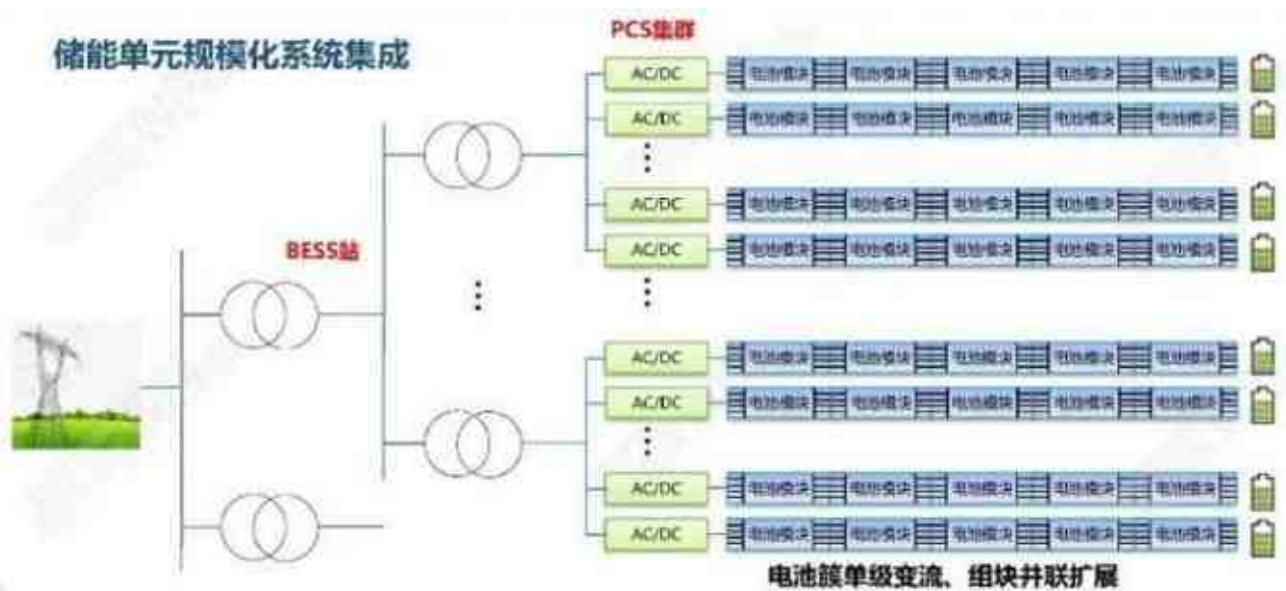


电池成组关联技术示意图

8.1 储能电站运行概述

◆ 电池模组集成技术

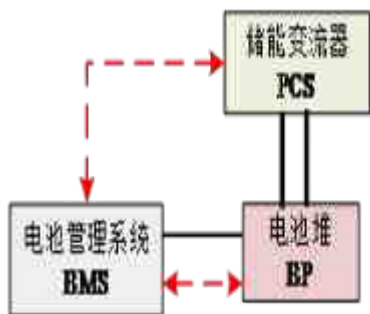
将各个电池单体成组为电池模组后，还需要进一步将这些电池模组集成为储能电站。根据实际要求，电池模组通过串并联的方式进行组合后与储能变流器（PCS）连接，将直流电变为交流电，再通过升压变压器提高电压等级，经汇流后连接至高压母线上。



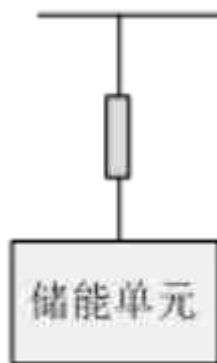
电池模组集成结构示意图

8.1 储能电站运行概述

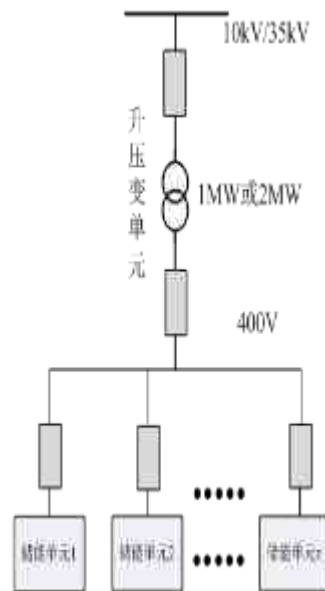
◆ 电池模组集成技术



储能单元结构示意图



储能支路结构示意图



储能回路结构示意图

储能单元结构：构成大容量储能系统的储能单元功率**250kW**或**500kW**;

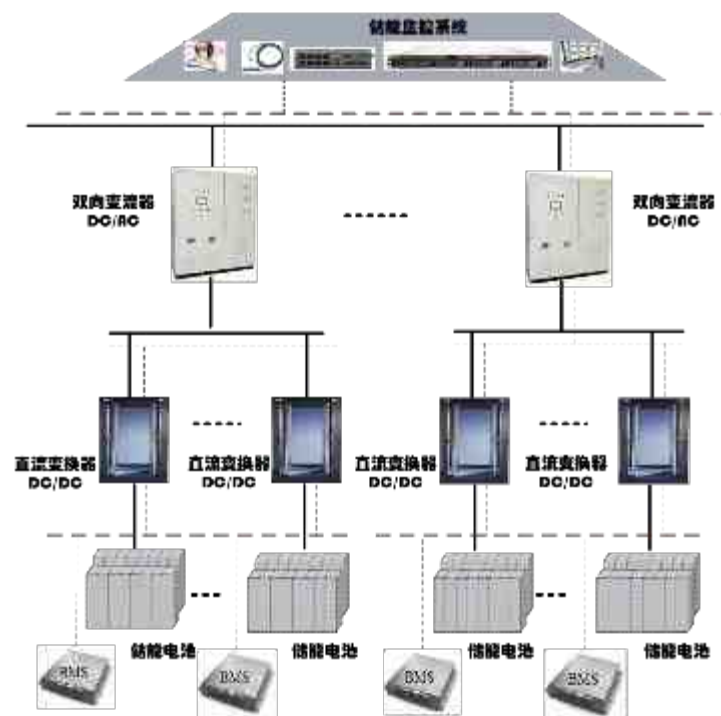
储能支路结构：由**1**个储能单元和**1**个低压接入开关构成;

储能回路结构：多条并联储能支路、**1**个升压变单元和对应的储能回路监测单元，其功率规格为**1MW**或**2MW**

8.1 储能电站运行概述

◆ 电池储能系统的组成

- ◆ 由于电池储能具有技术相对成熟、容量大、安全可靠、噪声低、环境适应性强、便于安装等优点，储能系统常用电池来储存电能。
- ◆ 目前电池储能系统由储能监控系统、交流控制部分、储能电池和电池管理系统构成。
- ◆ 目前比较常用的应用模式有：**能量型储能系统、功率型储能系统、电网级储能系统商用储能系统、家用储能系统等。**



电池储能系统接线示意图

8.1 储能电站运行概述

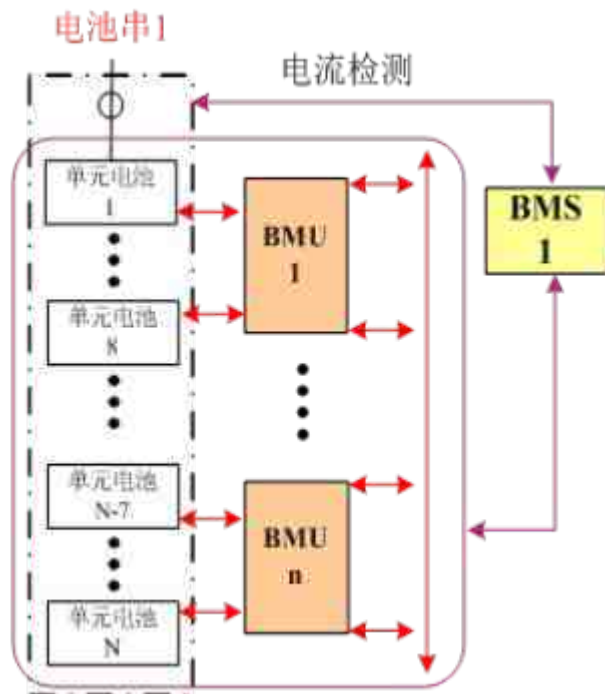
1、电池管理系统（BMS）

BMS管理电池状态、均衡以及电池系统分析。

电池的状态包括电池单体电压、内阻、组端电压、充放电电流、温度、荷电状态、健康状况和绝缘状态。

当监测到电池系统电压或荷电状态达到阈值时，软件根据均衡策略自动启动均衡电路的开启与关闭。

电池系统分析包括已充电量、可充电量等信息分析；电压、温度过高过低等异常分析及掉线、螺丝松、内部信息断等系统异常分析。



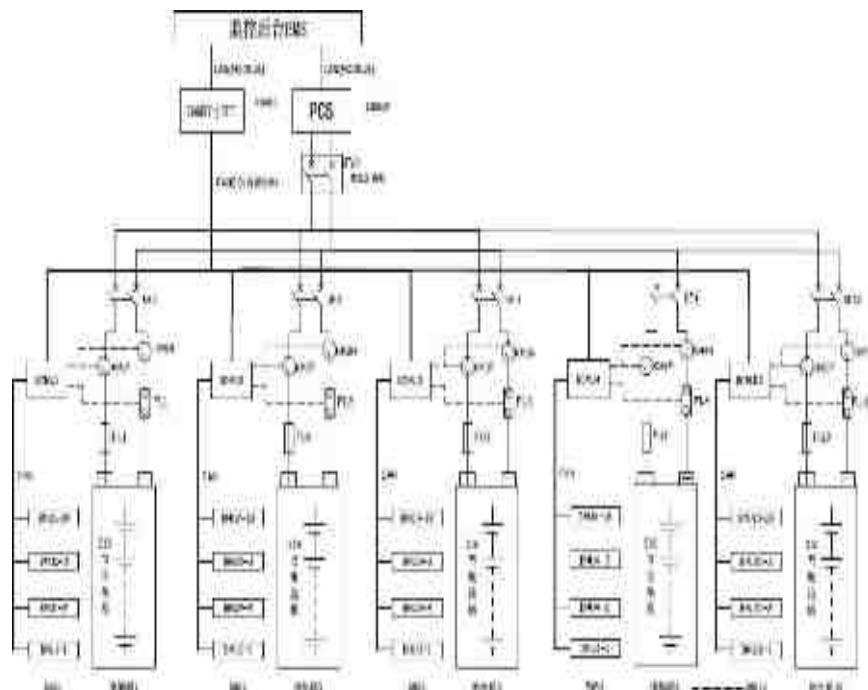
电池管理系统结构示意图

8.1 储能电站运行概述

1、电池管理系统（BMS）

BMS通过对锂电池电压、温度、电流等实时数据进行关联分析同时考虑电池组的总充电容量、总放电容量、使用时间、循环次数等因素，可实现锂电池健康状态的评估；同时也可通过核对性充放电过程对电池健康状态进行修正。

BMS中数据采集、计算部分与报警保护控制部分分离；**BMS**系统内**CAN**总线，对外采用**RJ45**以太网，布线简单、通用。**BMS**通信模块可采用**Modbus/IEC61850/IEC104**规约，无须单独模块。

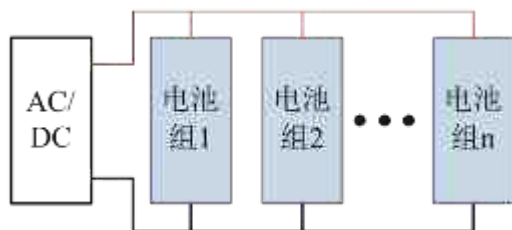


电池储能系统接线图

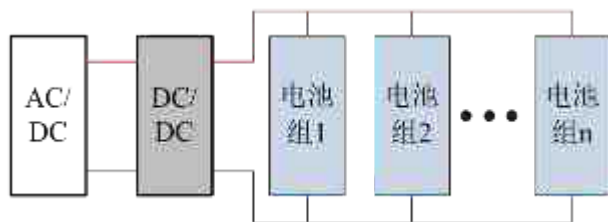
8.1 储能电站运行概述

2、储能变流器（PCS）

➤ 储能变流器（PCS）作为电网与储能装置之间的接口，是储能系统的重要组成部分。它能够应用于储能系统并网、储能系统孤岛运行并在两者之间进行状态切换。



单级变流器拓扑示意图



两级变流器拓扑示意图



储能变流器实物图

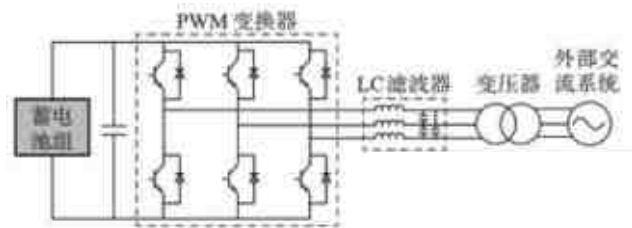
8.1 储能电站运行概述

2、储能变流器（PCS）

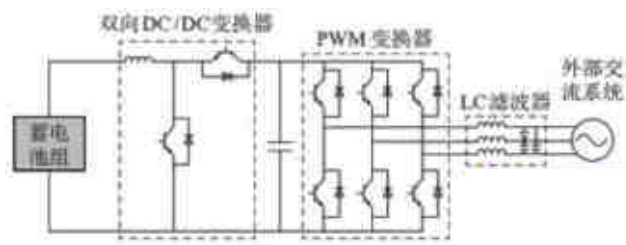
- ◆ 储能变流器按照有无DC/DC结构一般可分为单级变流器拓扑结构、双级变流器

器拓扑结构和模块并联变流器拓扑结构。

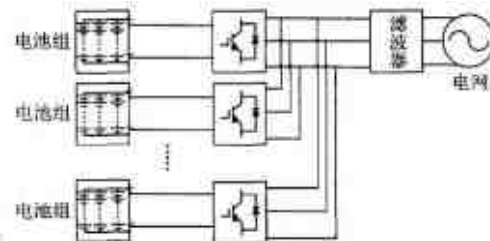
- ◆ 单级变流器拓扑结构简单可靠、效率高 可并联多组电池组，但电池串联组数调节不灵活；
- ◆ 双级变流器拓扑结构中的电池串环节数 灵活可控，但电路及控制较复杂、可靠性和效率偏低；
- ◆ 模块并联变流器拓扑结构 可连接大容量 长时间储能系统，且电池并联组数灵活 可控，但控制复杂、离网运行困难、成本高。



单级变流器拓扑结构



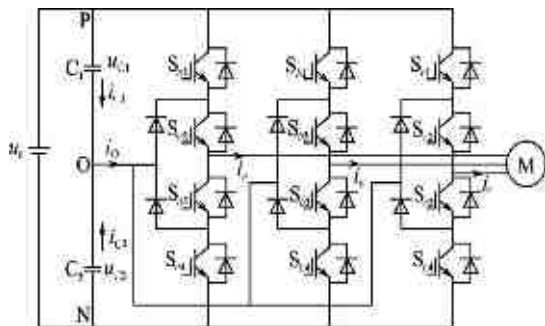
双级变流器拓扑结构



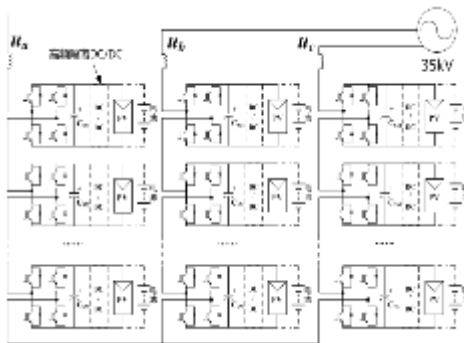
模块并联变流器拓扑结构

8.1 储能电站运行概述

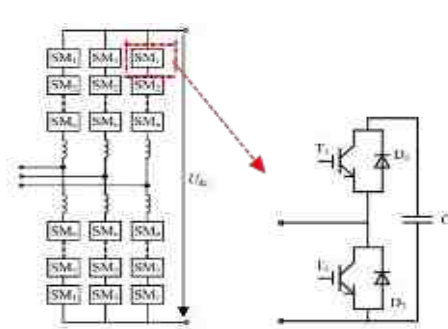
2、储能变流器（PCS）



中点钳位型拓扑结构



H桥级联方式拓扑结构

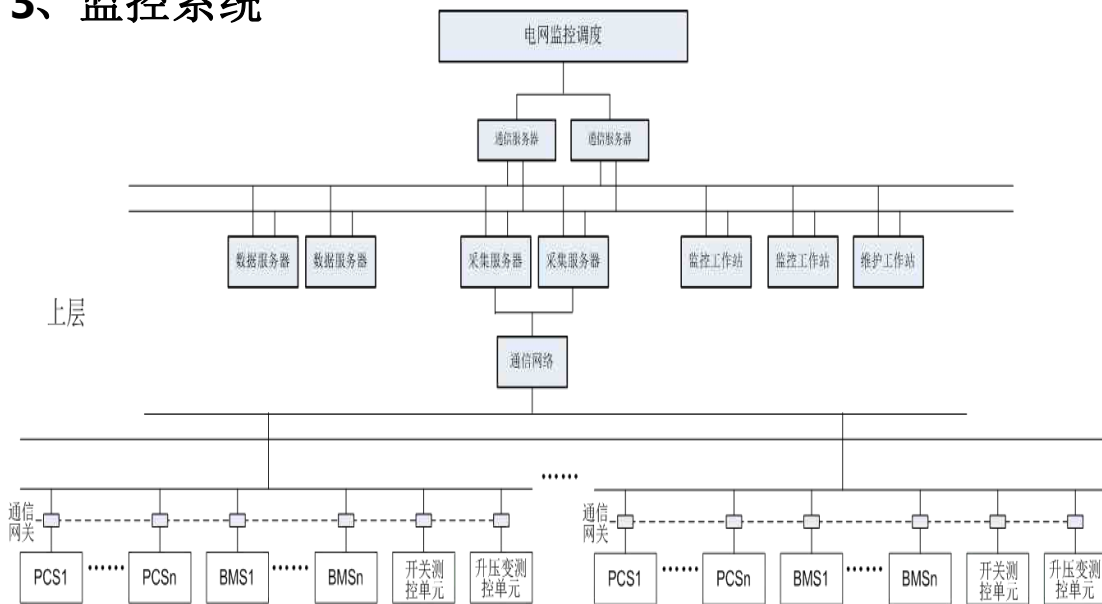


模块化多电平方式拓扑结构

- ◆ 中点钳位型拓扑能输出更高的电平，有效提高变换器并网电流质量，降低系统共模电压对电池储能系统的冲击。
- ◆ 级联H桥储能拓扑可通过串联H桥模块来提高系统电压等级，有效的规避了大规模储能电池的串联。由于系统中每个模块可以独立的工作而互不影响，方便直流储能单元的功率控制、系统的容错控制。
- ◆ 模块化多电平储能拓扑与H桥拓扑一样其储能单元分散的配置于单元模块中，不同的是模块化多电平拓扑结构具有公共直流母线。公共直流母线的存在可显著减小储能单元中的纹波电流以及系统的滤波电感，但也使得系统中的功率器件承受更高的关断电压。储能单元也可以通过双向的DC/DC变换器连接到MC的各个子模块中，实现能量的分散存储，有效提供系统的故障穿越能力。

8.1 储能电站运行概述

3、监控系统



储能监控调度示意图



储能监控系统主界面

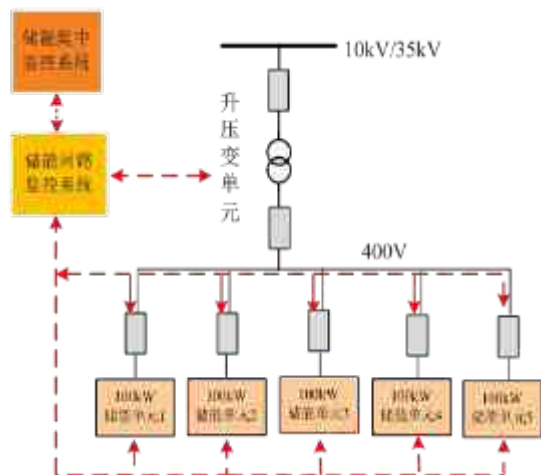
储能监控系统一般由两层结构构成：

➤ **就地监测系统**——监控多条回路（**PCS**、**BMS**、并网开关、升压变）的运行状态信息，并上传至储能电站监控系统

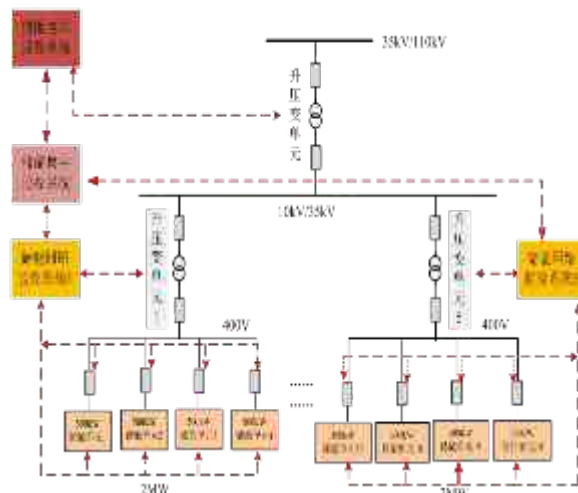
➤ **储能电站监控系统**——与电网调度进行数据和信息交换，接受调度指令，根据储能系统状态优化功率分配

8.1 储能电站运行概述

4、储能系统集成应用——典型结构



回路型储能系统



电站型储能系统

➤ **回路型储能系统**通过并网开关柜直接接入**400V**低压电网，通过升压变单元接入 **10kV**或**35kV**电压等级。功率等级一般为**200kW-1MW**，适用于配电网/变电站侧的削峰填谷和分布式能源接入等。

➤ **电站型储能系统**接入**10kV**及以上电压等级（**35kV**、**110kV**）。功率等级一般为接入**400V**低压电网后，通过升压变单元**1MW**和**2MW**，其中储能回路的功率等级为**1MW**或**2MW**

8.1 储能电站运行概述

- ◆ 例8-1 对于某一储能电站，规划功率为**250kW**，电压等级为**768V**。采用电压为**3.2V**、电流为**65A**、容量为**130Ah**的单体电池进行集成。考虑到经济、环境、安全等因素，先将**8个单体电池组合为电池模组**，试推导电池模组和储能电站的电流、电压、功率 以及它们之间的连接方式。

解：

对于每个电池模组：

由题意得，每**8个**电池单体串联，构成一个电池模组，则 电池模组的电压等级为： **$3.2V \times 8 = 25.6V$** ；

电池模组的功率等级为： **$25.6V \times 65A \div 1000 \approx 1.66kW$** ； 电

池模组的容量等级为： **$3.2 \times 130 \times 8 \div 1000 \approx 3.33kWh$** 。

对于集成后的储能系统：

由**250kW** **$1.66kW \div 150$** ，可知该储能系统由**150个**电池模组组成； 由

$768V \div 25.6V = 30$ ，可知有**30个**电池模组是串联关系；

又由于一共**150个**电池模组，故 **$150 \div 30 = 5$** 个。即

由**5个**电池单元并联得到储能电站。

8.1 储能电站运行概述

- ◆ 例8-2 对于某储能电站，其放电深度（DOD）为90%，衰减率为10%，充放电效率为93%。（1）若其实际输出功率、能量为10MW/20MWh，试计算其设计容量。（2）若一个电池单元的额定容量为358.4kWh，额定电压为640V；一个电池模组的额定电压为64V，额定容量为17.92kWh，试计算电池单元的数量（保留整数），并设计电池单元中模组的排列方式。

解：

（1）需要配置储能的容量为： $20 \div 0.93 \div 0.9 \div (1 - 0.1) \times 103 = 26549 \text{ kWh}$ 。

（2）需要电池单元的数量为： $26549 \text{ kWh} \div 358.4 \text{ kWh} \approx 75$ 个；

电池模组数量为： $358.4 \text{ kWh} \div 17.92 \text{ kWh} = 20$ 个

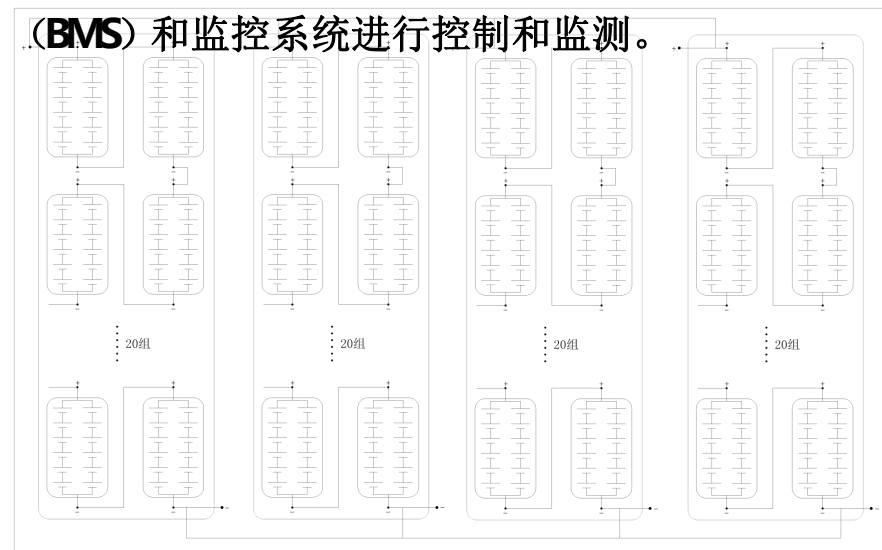
即每个电池单元由20个模组构成。又因为每个电池单元的额定电压为640V，每个电池模组的额定电压为64V， $640 \div 64 = 10$ 个，易知每个电池单元中的模组采用2并10串的方式

（即10个64V串联，两组十个电池并联）。

8.1 储能电站运行概述

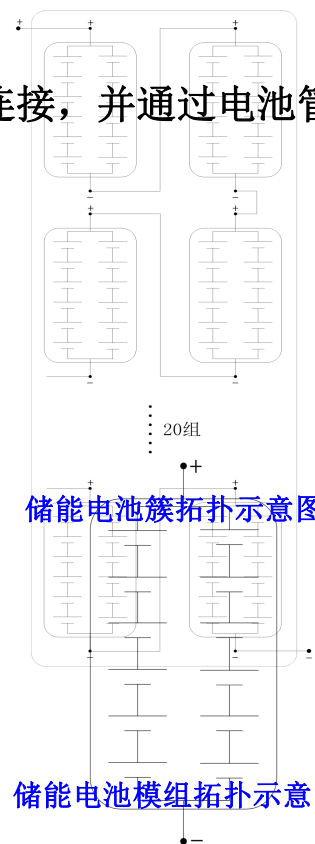
某储能电站的容量为**1MW**，由**4个250kW**电池单元并联组成。每个电池单元还可以进行三个层级的细分：**（1）**每个电池单元由**20个**电池包串联而成（即采用**1并20串**的连接方式）；**（2）**每个电池包由**2个**电池模组串联而成；**（3）**每个电池模组由**12个**电池单

体通过**2并6串**的方式构成。这些电池单体在电路上实现耦合连接，并通过电池管理系统



四个电池簇并联为一个集装箱

某储能电站拓扑示意图



储能电池簇拓扑示意图

储能电池模组拓扑示意图

8.1 储能电站运行概述

□ 大规模储能系统运行的影响因素

◆ 电池本体技术成熟度

不同类型电池本体的技术成熟度存在一定的差别，会对集成后的储能系统运行情况产生影响。

◆ 控制方式

将大规模的储能电站投入到实际应用中，需要采用相应的储能系统控制方式满足其应用要求。

◆ 安全风险

在运行过程中，**电池选型、设计**不合理将导致电池过热，过度充电可能引发短路并导致发热失控，**电池连接松动、系统内部温度管理**不当也会引发热滥用，严重时将出现爆炸、火灾事故并造成人员伤亡。

◆ 经济效益

在市场环境下，储能电站运行的**重要目标**就是**获取经济效益**。从这个角度而言，经济效益也会对储能电站的运行情况产生重要影响，

8.2 储能电站的运行控制方式

□ 典型应用场景下储能电站的运行控制方式

◆ 平抑新能源出力波动

为了平抑新能源出力的波动，可以在电网配置一定容量的储能，通过储能系统的充放电调节，减小新能源的出力波动。在实际应用过程中，可分以下三种情况进行控制：

- 1 当新能源实际功率大于预测功率且偏差超过电网可接受的限值时，由储能系统吸收多余的功率；
- 2 当新能源实际功率小于预测功率且偏差超过电网可接受的限值时，由储能系统补充功率不足部分；
- 3 当新能源实际功率偏差处于电网可接受的范围之内时，储能系统也相应处于备用状态。

8.2 储能电站的运行控制方式

◆ 平抑新能源出力波动

利用公式进行描述，有：

$$P_t(i) = P_{bess}(i) + P_{new}(i)$$

$$\Delta P_{lm}(i) = P_{new}(i) - P_t(i-1)$$

$$P_{lm}^{bess}(i) = \begin{cases} Fl_{lm} - \Delta P_{lm}(i), & \Delta P_{lm}(i) > Fl_{lm} \\ -Fl_{lm} - \Delta P_{lm}(i), & \Delta P_{lm}(i) < -Fl_{lm} \\ 0, & -Fl_{lm} \leq \Delta P_{lm}(i) \leq Fl_{lm} \end{cases}$$

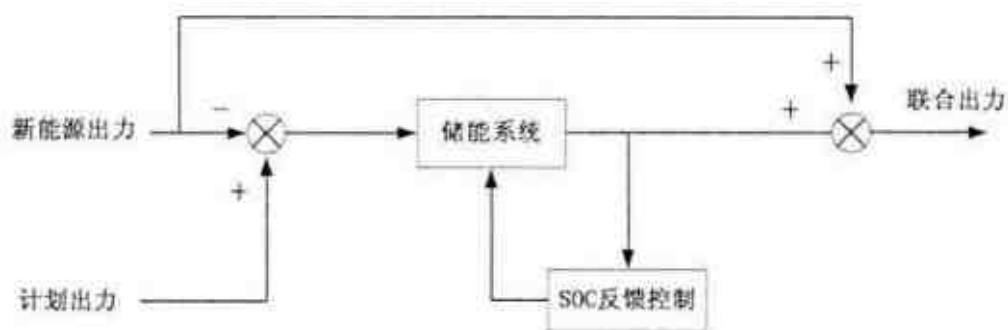
式中， $i=2, 3, 4 \dots 1440$ 表示分钟数； P_t 为新能源与储能联合出力； P_{new} 为新能源出力和联合出力的差，表征1min的波动； Fl_{lm} 为允许1min功率波动的最大值； P_{lm}^{bess} 为平抑1min波动所需储能的出力。

8.2 储能电站的运行控制方式

□ 典型应用场景下储能电站的运行控制方式

◆ 跟踪计划出力

在电力系统的运行调度过程中，电力调度中心需要为各个发电厂制定日发电计划。考虑到了新能源场站的随机间歇性，需要加配储能电站，并通过跟踪控制补偿新能源场站实际功率与发电计划的差值，以满足运行调度要求。



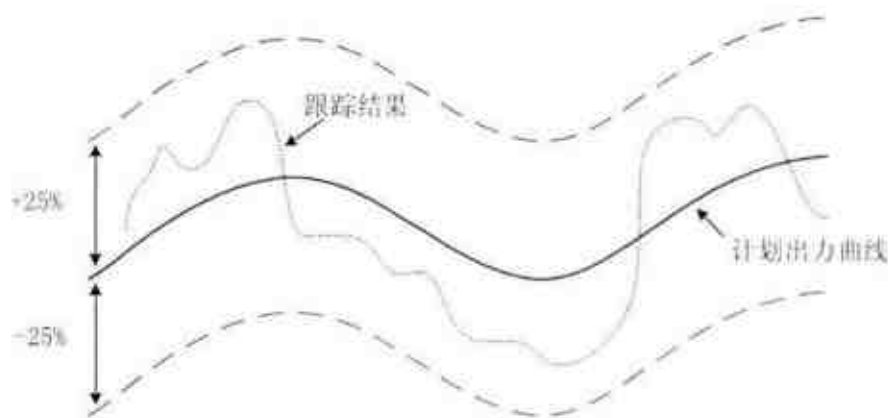
跟踪计划出力控制原理图

8.2 储能电站的运行控制方式

□ 典型应用场景下储能电站的运行控制方式

◆ 跟踪计划出力

计算新能源出力与计划出力之间的偏差。若新能源出力与计划出力之间的偏差小于某一设定值则可认为该新能源出力是合格的，否则需要通过储能对其进行补偿，以满足跟踪计划出力的要求。



跟踪计划出力示意图

8.2 储能电站的运行控制方式

□ 典型应用场景下储能电站的运行控制方式

◆ 削峰填谷

削峰填谷是储能在电力系统的一个重要应用场景。在电力负荷处于低谷期时，电网向储能系统充电；在电力负荷处于高峰期时，储能系统向电网放电。为了实现储能在削峰填谷中的充放电功能，一般可以采用恒功率充放电和功率差充放电两种控制方式。

1、恒功率充放电控制方式

在恒功率充放电控制方式下，储能电站先根据历史负荷曲线制定出相应的充放电规则，无论实际的负荷如何变化，均按照该规则以恒定功率的方式进行充放电。

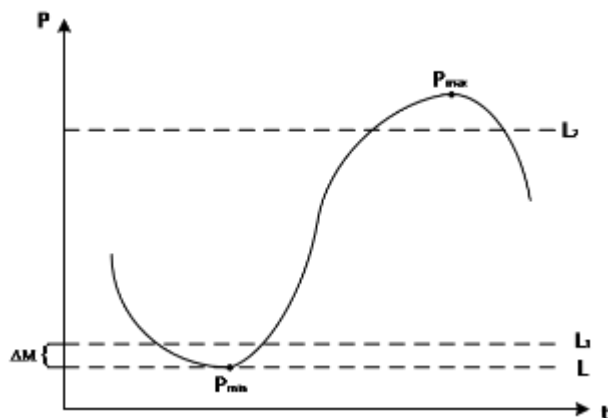
(1) 由储能电站容量 E 和恒定充放电功率 P 计算出最大的充放电时间为：

$$T=E/P$$

8.2 储能电站的运行控制方式

2根据所预测的日负荷曲线确定负荷低谷点，并在该点处作出水平线L。从负荷低谷点出发，以一个较小的步长 ΔM 向上移动，此时水平线L会与预测曲线交于两点，实时测量两点之间的距离。将测出的两点距离与充电时间T相比：若相等，则说明该区域为储能电站较为合理的充电区域；若不等，则将L继续以步长 ΔM 向上移动，直至两者距离相等，由此确定出储能电站的充电时间段。

3以与步骤（2）类似的方式确定储能电站的放电时间段。需注意，若电网负荷曲线存在多个负荷高峰期或低谷期，水平线会与负荷曲线相交于多个点，并形成多个充放电时间段，此时需要判断这几个时间段之和是否等于充放电时间T。

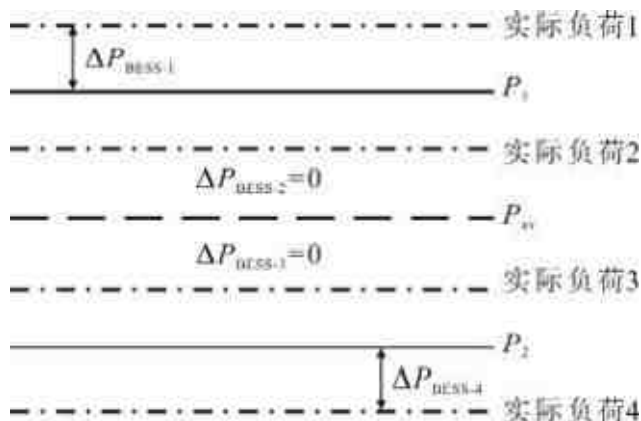


恒功率充放电控制策略下的削峰填谷原理

8.2 储能电站的运行控制方式

2) 功率差充放电控制方式

制定储能放电的基准线 P_1 和充电的基准线 P_2 。当实际负荷大于 P_1 时，储能按实际负荷与 P_1 的差值进行放电，以起到削峰的效果（比如，对于实际负荷1，其超过 P_1 则储能按 ΔP_{BESS-1} 放电）。类似的，实际负荷小于 P_2 时，储能按 P_2 与实际负荷的差值进行充电，以起到填谷的作用（比如，对于实际负荷4，其小于 P_2 则储能按 ΔP_{BESS-4} 充电）。当实际负荷处于 P_1 和 P_2 之间，则储能不动作。通过这种方式，可能将负荷的峰谷限制在 P_1 和 P_2 之间。



功率差控制策略示意图

8.2 储能电站的运行控制方式

从上幅图可见， P_1 越小， P_2 越大，则削峰填谷的效果越好。但是 P_1 过小、 P_2 过大则可能导致储能的容量越限。为此，可按照下面式子确定 P_1 和 P_2 的值。

$$\sum_{t=t_{j-1}}^{t_j} (P_2 - P_c) \Delta t = E_c < E$$

$$\sum_{t=t_{k-1}}^{t_k} (P_d - P_1) \Delta t = E_d < E$$

$$E_c - E_d < \varepsilon$$

式中： E_c 、 E_d 分别为储能电站在负荷低谷和高峰时段的持续充、放电能量； E 为储能电站的最大能量容量； ε 为储能电站的充放电平衡系数，其值无限接近0； Δt 代表单位时间； P_d 、 P_c 分别为高峰、低谷时间段内的负荷功率，即 $P_d \in [P_1, P_{\max}]$ 、 $P_c \in [P_{\min}, P_2]$ ， $P_{\max}$ 、 $P_{\min}$ 分别为负荷的峰、谷值。

8.2 储能电站的运行控制方式

□ 典型应用场景下储能电站的运行控制方式

◆ 调频控制

传统的调频任务主要由水电、火电等机组承担，但是这些机组的响应速度通常为分钟级，难以快速响应AGC曲线。相对而言，电化学、飞轮等储能系统的响应速度为毫秒级，可以弥补火电机组响应速度的不足。因此，传统发电机组与储能联合调频成为一种较为理想的方式，可以描述为：

$$P_L = P_G + P_{battery}$$

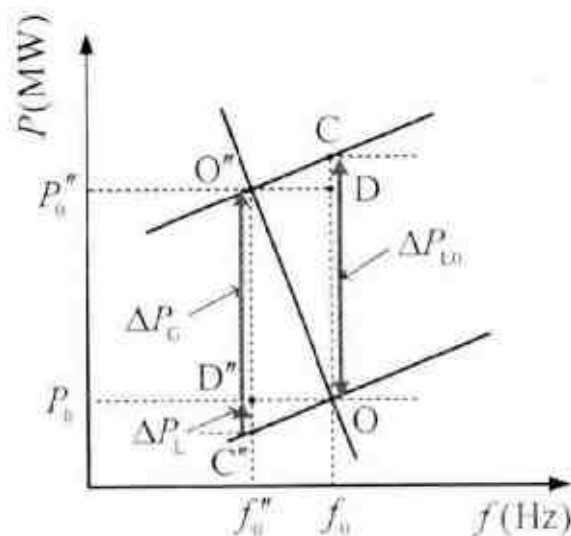
式中， P_L 是联合调频的输出总功率， P_G 是火电机组的输出功率， $P_{battery}$ 是电池储能系统的输出功率。

8.2 储能电站的运行控制方式

传统机组参与电网一次调频特性曲线如下图所示，其中初始运行点O为发电机频率特性与负荷频率特性的交点。假设发电机在O点运行时负荷增 ΔP_{L0} ，则由发电机及负荷的频率调节特性共同作用，使得系统达到一个新的运行点O'。此时系统频率由 f_0 下降到 f_0'' 。在一次调频过程中，传统机组和负荷的功率调节作用可描述为：

$$\Delta P_{L0} = - (K_G + K_L) (f_0'' - f_0)$$

式中， K_G 为同步发电机的单位调节功率； K_L 为负荷的单位调节功率。



传统机组一次调频原理

8.2 储能电站的运行控制方式

储能电站辅助传统机组参与电网一次调频过程

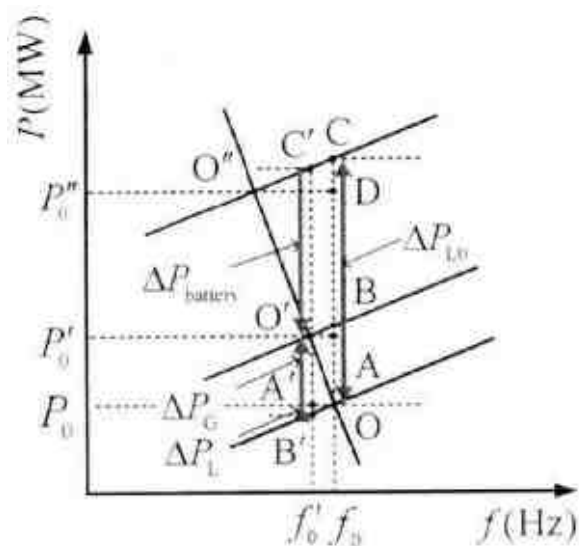
程 如下图所示，为储能电站的调频出力， $A'O'$ 为传统机组的调频出力， $B'A$ 为负荷的自身调节功率。在储能电站、传统机组以及综合负荷的共同作用下，系统达到新的稳定运行点，此时系统频率由 f_0 下降到 f'_0 。储能电站、传统机组以及综合负荷的功率调节效应可描述为：

$$\Delta P_{L0} = - (K_{battery} + K_G + K_L) (f'_0 - f_0)$$

$$K_{battery} = - \frac{\Delta P_{battery}}{\Delta f}$$

$$\Delta P_{battery} = - (K_m \cdot \Delta f + D \cdot \Delta \omega)$$

式中， Δf 为系统频率测量值与参考值的偏差； $\Delta \omega$ 为转速变化量； D 为阻尼系数； $\Delta P_{battery}$ 为储能系统调频出力； $K_{battery}$ 为单位调节功率，由储能电站的正向静态频率特性、系统的频率偏差量与储能电站的调差系数共同决定。



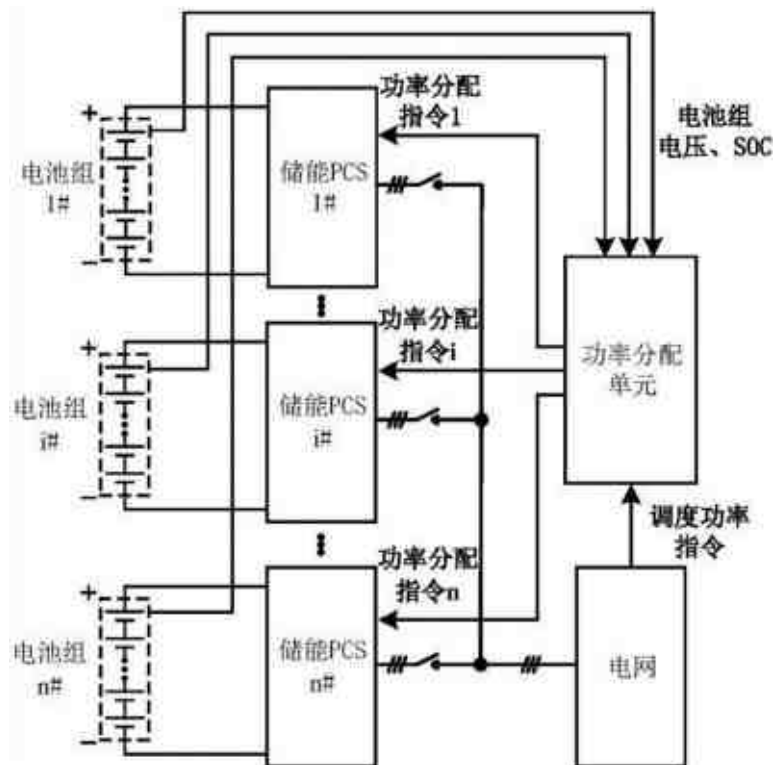
储能参与传统机组一次调频原理

8. 2储能电站的运行控制方式

□ 多储能单元间功率分配策略

在对储能电站内部的各个储能单元进行功率分配时，需要考虑每个储能单元的**电池荷电状态（SOC）**、**待充放电功率等因素**的影响。根据这些因素的不同，主要可以分为以下几种情况：

- ◆ 各储能单元的荷电状态和额定功率均相同
- ◆ 各储能单元的荷电状态相同，额定功率不同
- ◆ 各储能单元的**SOC**不同



储能子系统间功率分配指令流向图

8. 2储能电站的运行控制方式

□ 多储能单元间功率分配策略

◆ 各储能单元的荷电状态和额定功率均相同

在各储能单元的荷电状态和额定功率均相同的情况下，可以采用均分法对每个储能单元的充放电功率进行分配，如下式所示。

$$P_{E_k} = \frac{P_T}{n}, \quad k = 1, 2, \dots, n$$

式中， P_{E_k} 为第 k 个储能系统的充放电功率； P_T 为储能电站的充放电功率； n 为储能单元的个数。

8. 2储能电站的运行控制方式

□ 多储能单元间功率分配策略

◆ 各储能单元的荷电状态相同，额定功率不同

在各储能单元的额定功率不同时，可以采用比例法对每个储能单元的充放电功率进行分配，如下式所示。

$$P_{E_k} = \frac{P_{N_k}}{P_{N_1} + P_{N_2} + \cdots + P_{N_n}} P_T, \quad k = 1, 2, \dots, n$$

式中， P_{E_k} 为第k个储能系统分配的功率； P_{N_k} 为第k个储能单元的额定功率。

8.2 储能电站的运行控制方式

□ 多储能单元间功率分配策略

◆ 各储能单元的荷电状态（SOC）不同

在各储能单元的荷电状态不同时，应以它们的SOC为约束条件进行功率分配。一般可以将每个储能单元的SOC划分为五个区间，再根据它们的充放电特性曲线及SOC值，确定每个区间内的充放电功率。将储能SOC的上、下限值分别记为 SOC_{max} 、 SOC_{min} ，储能SOC的高、低限值分别记为 SOC_{high} 、 SOC_{low} ，有：

- （1）**SOC越上限区**： $SOC \geq SOC_{max}$ 时，限制该储能单元充电，允许其正常放电；
- （2）**SOC高限值区**： $SOC_{high} \leq SOC < SOC_{max}$ 时，储能单元应以少充多放为原则进行运行，尽量减缓SOC的增加；
- （3）**SOC正常工作区**： $SOC_{low} \leq SOC < SOC_{high}$ 时，储能单元可正常充放电；

8.2 储能电站的运行控制方式

4 **SOC低限值区**：尽量 $SOC_{min} \leq SOC < SOC_{low}$ 时，储能单元应以少放多充为原则进行运行，减缓SOC的下降；

5 **SOC越下限区**： $SOC < SOC_{min}$ 时，限制储能单元放电，允许其正常充电。
在上述原则下，可进一步按照下面几个式子确定每个各储能单元的具体充放电功率。

式中， S_{Nk} 为第k个储能单元的额定容量；

P_{Ckj} 为第k个储能单元在第i时刻的充电功率；

P_{Dki} 为第k个储能单元在第i时刻的放电功率；

P_{TCi} 为储能电站在第i时刻的总充电功率；

P_{TDi} 为储能电站在第i时刻的总放电功率；

T_C 为第k个储能单元的充电时间；

T_D 为第k个储能单元的放电时间； α 为储能单元的充电调节系数；

β 为储能单元的放电调节系数。

$$P_{Ckj} = \alpha P_{Nk} \quad \sum_{k=1}^n P_{Dki} = P_{TDi}$$

$$P_{Dki} = \beta P_{Nk} \quad \sum_{k=1}^n P_{Cki} = P_{TCi}$$

$$\sum P_{Cki} T_C = \sum P_{Dki} T_D \leq S_{Nk}$$

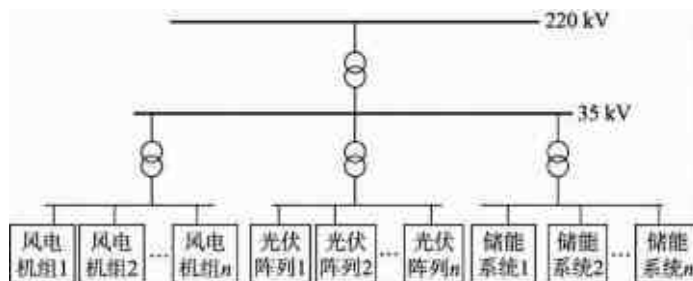
8.3 储能电站运行示范工程

□ 张北风光储输示范工程

张北风光储输示范工程是国家财政部、科技部、能源局和国家电网公司联合推出的“金太阳示范工程”的首个重点项目，是迄今为止世界上规模最大的集风力发电、光伏发电、储能系统、智能输电于一体的新能源示范电站之一。项目规划建设500MW风电场、100MW光伏电站和容量储能电站一座，建设100MW光伏电站100MW储能20MW，配套建设一座220KV智能变电站。



张北风光储示范项目

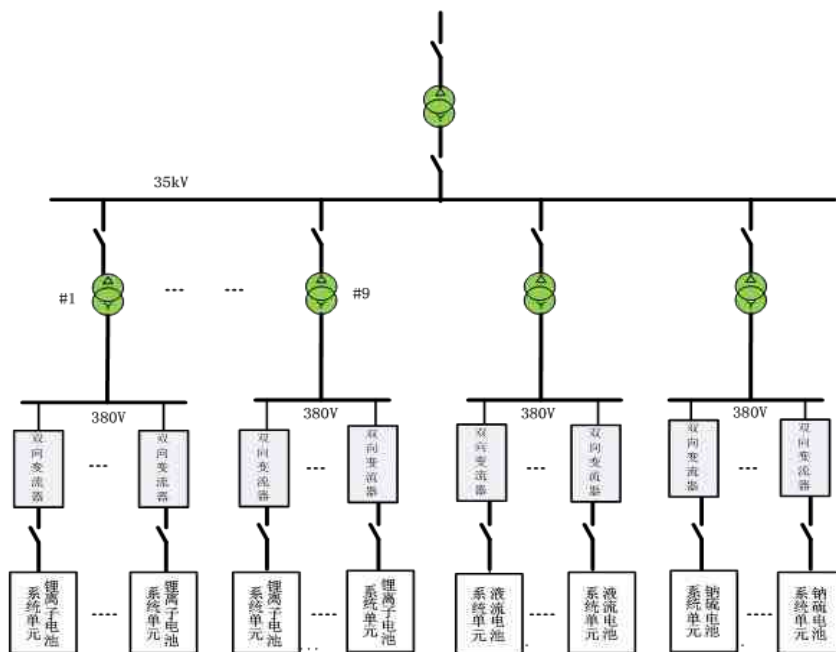


风光储总架构示意图

8.3 储能电站运行示范工程

◆ 储能系统概况

张北风光储输示范工程一期规划储能装机容量为~~20MW~~**95MW**，包括~~磷酸铁锂储能~~**14MW**~~6MWh~~、液流储能~~2MW~~**8MW**和一定容量的钠硫储能等，是目前世界上较具代表性的大规模多类型化学储能电站之一。其接线示意图如图所示。



储能电站系统接线图

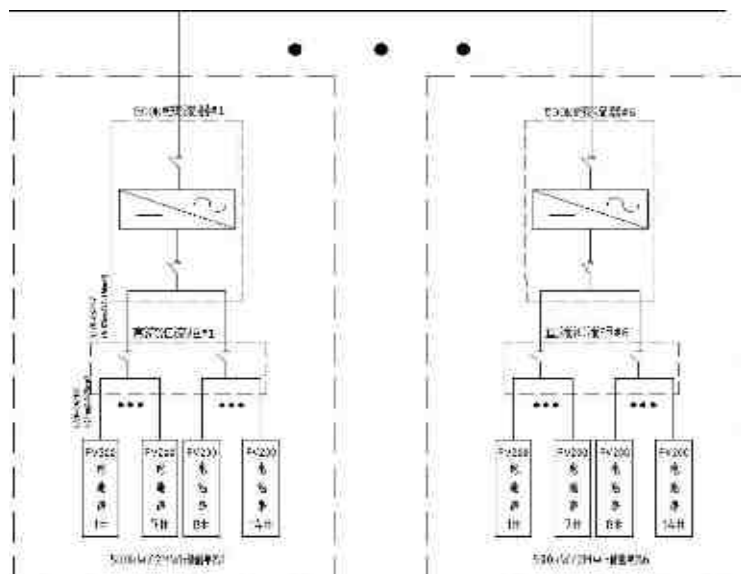
8. 3储能电站运行示范工程

◆ 示范项目储能系统集成

1、磷酸铁锂电池储能的集成方式

以**2MW**的储能单元为例，对磷酸铁锂电池储能的集成方式进行说明，其拓扑如图所示。

该储能单元含有**14个电池包**，它们通过**2并7串**的方式集成后连接至直流汇流柜中，再通过**500kW**变流器接入变电站。



2MW储能单元的拓扑结构图

8. 3储能电站运行示范工程

◆ 示范项目储能系统集成

2、液流电池储能的集成方式

液流电池储能系统的容量为**2MW**，包含**10个**全钒液流电池单元，每个单元的功率为**200kW** 每个单元通过**1台PCS**以将直流变为交流，再采用**10并1串**的方式集成至**2MW**，最后升压接入电网。

3、钠硫电池储能的集成方式

钠硫电池储能系统的容量为**4MW**，共包含**4个**钠硫电池单元。每个钠硫电池单元包括**20个50kW**的电池包，它们通过**2并10串**的方式集成至**1MW** 与液流电池储能系统类似，每个单元通过**PCS**将直流转换为交流，再升压接入电网。

8.3 储能电站运行示范工程

◆ 储能系统的控制方式

张北风光储输示范工程根据风电、光伏和储能系统的运行情况，采用6种控制模式，具体如下：

模式1：风电系统单独出力；模

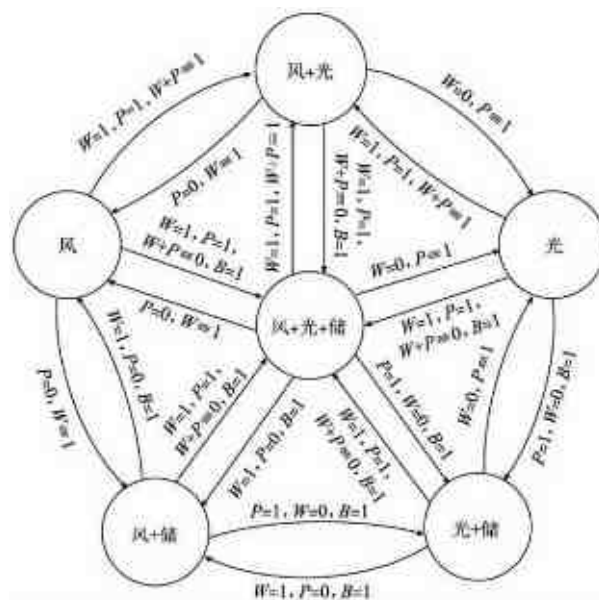
式2：光伏系统单独出力；

模式3：风电、光伏系统联合出力；模

式4：风电、储能系统联合出力；模式5：

光伏、储能系统联合出力；

模式6：风电、光伏、储能系统联合出力。



储能系统控制方式关系图

8.3 储能电站运行示范工程

□ 辽宁卧牛石全钒液流电池储能示范工程

辽宁卧牛石全钒液流电池储能示范工程是辽宁卧牛石风电场的配套储能电站。卧牛石风电场的装机容量为**50MW**，按**10%**的比例配备了**5MW**的储能，共由**5组1MW**全钒液流储能单元组成，最大充/放电时长为**2h**。



卧牛石风电场

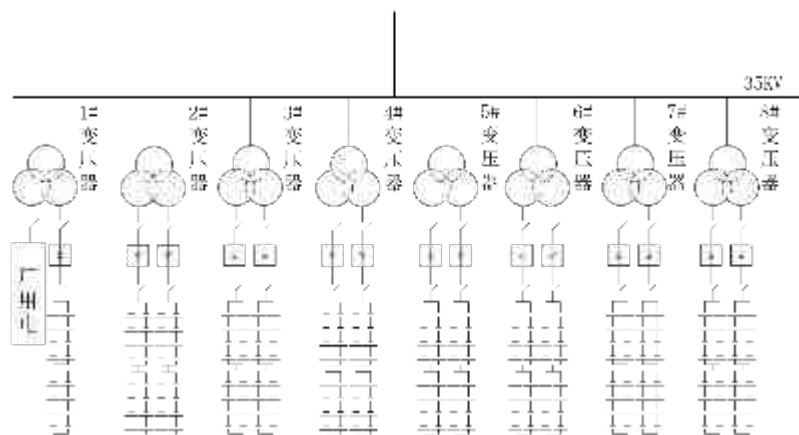


卧牛石风电场配套储能

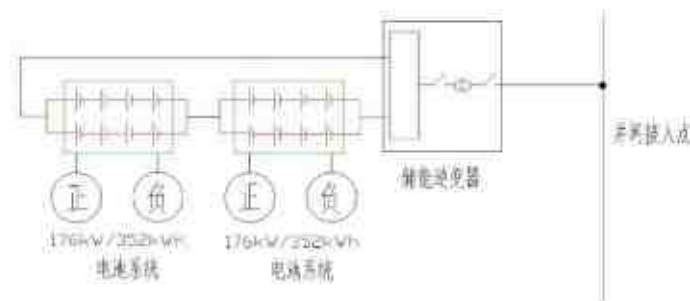
8. 3储能电站运行示范工程

◆ 储能系统概况

该储能电站由**1个352kW×2h**和**7个704kW×2h**全钒液流电池单元组合而成，1个 352kW×2h 全钒液流电池单元又由**16个全钒液流电池包通过2并8串的方式组成**，如 图所示。每个全钒液流电池包括**1个正极电解液储罐、1个负极电解液储罐和8个电池 模组**（这**8个电池模组采用4串2并的成组方式构成**）。



液流电池储能电站一次接线图



液流电池储能电站的电池成组示意图

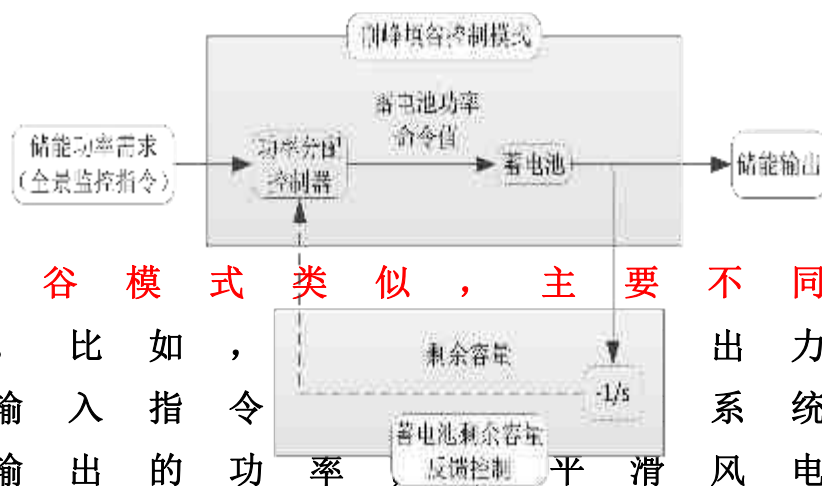
8.3 储能电站运行示范工程

◆ 储能系统的控制方式

辽宁卧牛石全钒液流电池储能示范工程提出了4种控制方案，**主要用于实现削峰填谷、跟踪计划出力、平滑风电功率输出、辅助调频4种场景。**

在削峰填谷的控制模式下，由**上层调度系统**根据系统的负荷峰谷变化向储能电站**下发功率调节指令**。储能电站接到指令后，通过分配控制器将其下发至各电池单元中，电池单元**根据自身容量进行反馈控制**，实现放/充电操作，以达到削峰填谷的效果。

其它三种模式与削峰填谷模式类似，主要体现在输入指令环节。比如，模式下，储能电站的输入指令发电计划和风电实际输出的功率，储能电站的输入指令为风电实际输出功率；在调频控制模式下，储能电站的输入指令为系统的调频功率需求。



削峰填谷控制框图

8.3 储能电站运行示范工程

□ 江苏镇江东部储能示范工程

江苏镇江东部储能示范工程是我国首个并网运行的百兆瓦级电池储能电站。该储能电站采用分布式配置的方式，在镇江东部的丹阳、扬中以及镇江新区的**8**个地点选址建设，单站容量从~~5MW/10 MWh~~至~~24 MW/48 MWh~~不等，总容量为~~101MW/202 MWh~~。示范工程采用集中控制的方式，将**8**个储能电站整合起来，接入江苏电网进行统一调控，**为镇江电网提供调峰、调频、紧急备用等多种辅助服务。**



江苏镇江东部储能示范工程

8.3 储能电站运行示范工程

◆ 储能系统调频

为了确保调频效果，需要对储能电站的调节精度、响应时间以及调节时间等指标进行测试，具体步骤如下：

步骤 1：假定储能系统的初始有功功率为0，额定功率为 P_N ，逐级调节有功功率的设定值至 $-0.25 P_N$ 、 $0.25 P_N$ 、 $-0.5 P_N$ 、 $0.5 P_N$ 、 $-0.75 P_N$ 、 $0.75 P_N$ 和 P_N 在储能系统并网点测量时序功率。

步骤 2：逐级调节有功功率的设定值至 $-0.75 P_N$ 、 $0.75 P_N$ 、 $-0.5 P_N$ 、 $0.5 P_N$ 、 $-0.25 P_N$ 和 0，在储能系统并网点测量时序功率。

步骤 3：根据每次有功功率变化后的第2个15s计算出这15s内的有功功率平均值。

步骤 4：计算步骤1至2各点的有功功率调节精度、响应时间和调节时间，其中有功功率调节精度按下式计算：

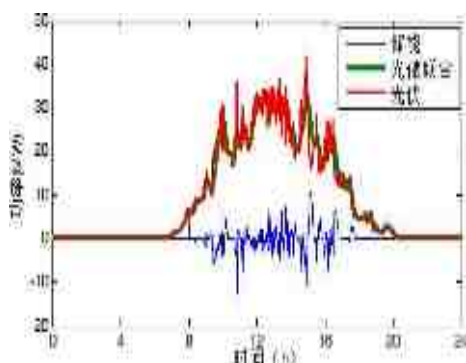
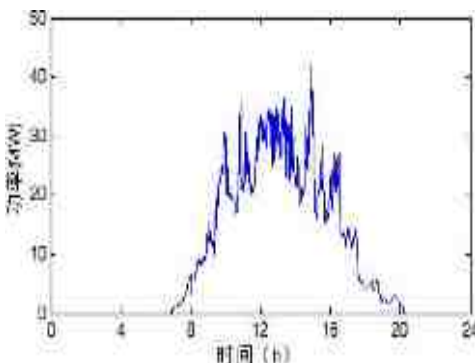
$$\Delta P\% = \frac{P_{set} - P_{meas}}{P_{set}} \times 100\%$$

式中： P_{set} 为设定的有功功率值； P_{meas} 为每次有功功率变化后第2个15s内的功率平均值； $\Delta P\%$ 为有功功率调节精度。

8. 4储能典型应用——新能源场站侧应用

□ 应用场景1——平滑新能源输出功率波动

➤光储电站运行效果分析——平滑模式：50MW光伏，15MW/18MWh储能

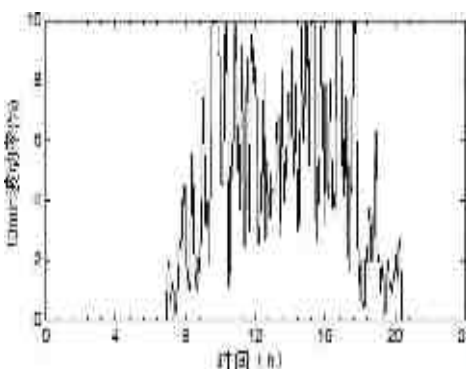
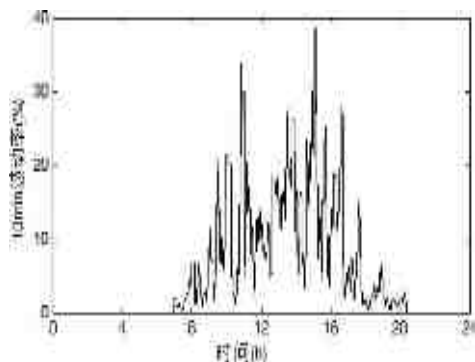


光伏10min波动率大于10%的概率

23.44%

光储10min波动率大于10%的概率

0



经过储能系统平滑后，光储10min波动率全部小于10%，加入储能系统后，减小了光伏发电波动，提高了光伏并网接入能力。

光储电站运行波形图

8.4 储能典型应用——新能源场站侧应用

□ 应用场景2——跟踪计划出力

为模拟未来新能源电站对发电计划的执行情况，当新能源出力大于新能源电站的发电计划值时，新能源出力将被限制至其计划值，其他情况下新能源电站出力保持不变。

■ 受发电计划限制后的新能源出力值为：

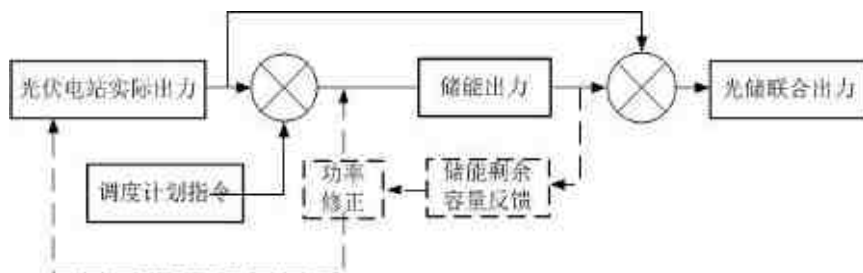
$$P_{WT} = \begin{cases} P_{WP} & P_{WP} > P_{WR} \\ P_{WR} & P_{WP} \leq P_{WR} \end{cases}$$

■ 储能补偿光伏发电计划和实际出力之间的偏差，并根据 SOC 反馈进行补偿功率和光伏出力修正

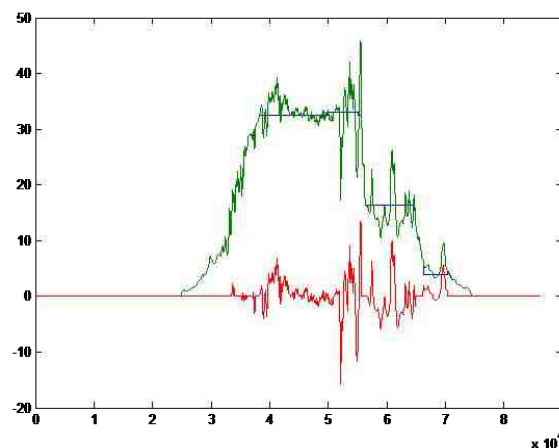
$$P_E = P_{WP} - P_{WT}$$

■ 当新能源执行发电计划时，在 t 时刻的限电值为：

$$C_t = \begin{cases} P_{WP} - P_{WT} & P_{WP} > P_{WR} \\ 0 & P_{WP} \leq P_{WR} \end{cases}$$



跟踪计划出力控制策略



跟踪计划出力波形

8.4 储能典型应用——新能源场站侧应用

□ 应用场景2——跟踪计划出力

➤ 光储电站运行效果分析——跟踪计划模式

相对于单独的光伏发电，加入储能系统后，光储联合跟踪调度误差明显减小，储能系统提高了光伏发电跟踪调度计划的能力；在特定时间段内，光储跟踪误差小于5%的概率基本达到90%以上；在多云天气(光伏波动较大情况时)，未达到90%的概率是因为误差超出了储能系统的最大充放电能力。

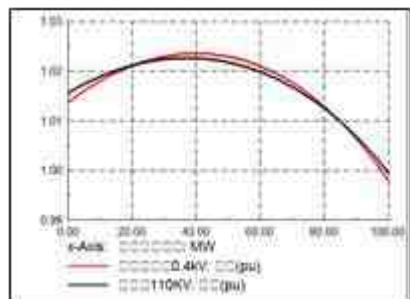
	多云	晴天	晴转阴
光伏跟踪误差小于5%概率（11:00-16:00）	12.9%	51.1%	56.8%
光储跟踪误差小于5%概率（11:00-16:00）	68.9%	97.9%	97.6%
储能充/放电量(kWh)（全天）	14790/13012	17751/17343	18091/15523

8. 4储能典型应用——新能源场站侧应用

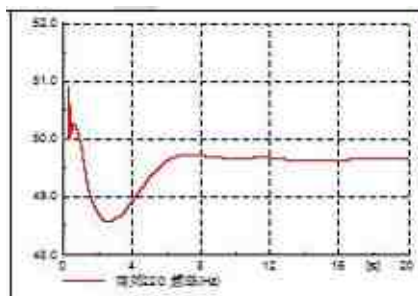
□ 应用场景3——提高新能源电站电压频率主动支撑能力

由于新能源资源的波动性和间歇性，发电设备的低抗扰性和弱支撑性，随着新能源装机容量的不断增大，电网**频率和电压稳定**问题突出，安全运行风险加大。

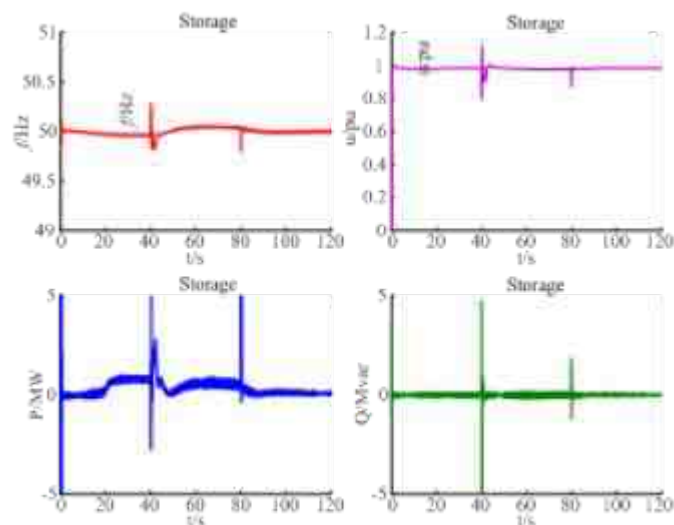
➤ 模拟光伏并网接入点**220kV**母线短路故障，接入储能的电压频率变化



电压失稳



频率波动加大



储能有功出力

储能无功出力

8. 4储能典型应用——新能源场站侧应用

□ 典型案例——青海格尔木光储电站（商业运营）



光伏**50MWp**，磷酸铁锂电池**15MW/18MWh**，配套建设**35kv**开关站一座；

2015年7月开工，**2016年7月**光储联合运行，储能电站投运以来，运行平稳、安全，光储跟踪调度误差小于**5%**的概率基本达到**90%**以上，限电率降低**6**个百分点。



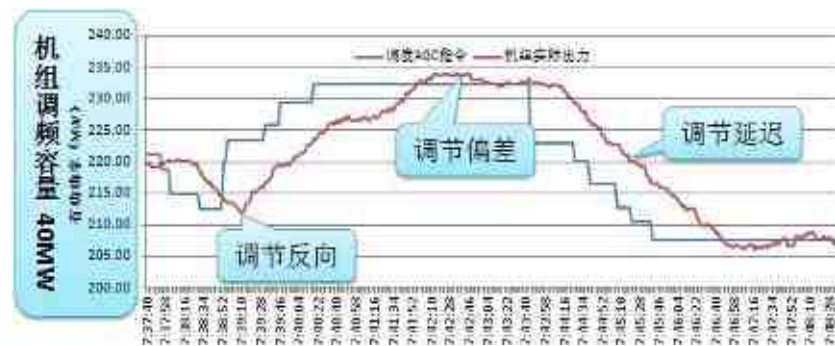
青海格尔木光储项目

8.4储能典型应用——发电侧调频辅助服务应用

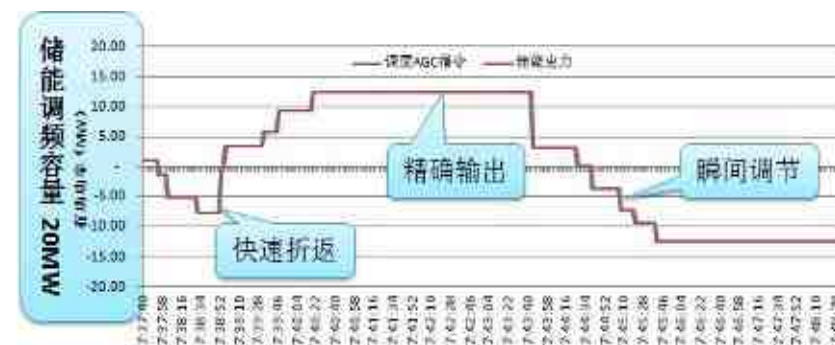
□ 应用场景4——储能辅助火电厂AGC调频

储能辅助火电厂AGC调频响应速度快，是水机组的1.7倍，燃气机组的2.5倍，燃煤机组的25倍；投资少，占地少，改造方便，收益高；储能辅助调频与原火电机组分开各自调节，最大限度地降低对机组控制安全性、稳定性和运行经济性的影响。储能辅助火电厂AGC调频在直接效益方面提升了电厂AGC调频性能(Kp)，获得更多补偿。在间接效益方面能够减少机组设备

磨损，延长设备寿命、减少机组调频备用，增加发电量；减少机组频繁变化处理，降低煤耗；提升机组整体的AGC调频能力，改善机组运行的可靠性和安全性。



火电机组跟踪电网AGC指令的响应过程



储能系统跟踪电网AGC调频响应过程

8.4储能典型应用——发电侧调频辅助服务应用

山西省火电联合储能调频项目情况

合作火电厂	储能企业	规模	状态
北京石景山热电厂	睿能世纪	2MW	停运
山西京玉热电厂	睿能世纪	9MW	2015年投运
山西阳光热电厂	睿能世纪	9MW/45MWh	2017年投运
山西同达电厂	科陆电子	9MW/478MWh	2017年投运
山西平朔煤矸石电厂	科陆电子	9MW/478MWh	签约
内蒙古上都电厂	科陆电子	18MW	签约

2018年，山西能监办又研究确定了晋能、同煤2家发电集团开展容量为150MW/600MWh的独立储能试点工作，9家发电企业开展容量为9MW/45MWh的储能联合火电试点工作。



科陆山西同达9MW/4. 478MWh AGC调频项目



山西阳光电厂储能联合调频项目



山西京玉热电厂储能联合调频项目

8.4储能典型应用——用户侧应用

用户侧储能典型应用场景主要可分为应急供电、提高供电能力等领域。

不同应用模式下储能的主要作用

应用模式	电网削峰	平抑光伏功率波动	提高光伏就地消纳	节省电量和需量电费	提高用电可靠性	提高电能质量
家庭户用储能			√	√	√	√
大用户储能		√	√	√	√	√
分布式储能	√	√	√		√	√

不同应用模式下储能的技术需求

应用模式	家庭户用储能	大用户储能	分布式储能
功率(kW)	数千瓦	数十千瓦-百千瓦	数十千瓦-数百千瓦
接入等级	220V或380V	0.4/10kV	0.4/10kV
放电深度	最长寿命	最大经济性	最大能量利用
放电时间	2-4h	6-8h	6-8h
响应时间	秒级	无缝切换	毫秒
放电周期	参考光伏出力曲线	每天一次循环	每天一次循环

8.4储能典型应用——用户侧应用

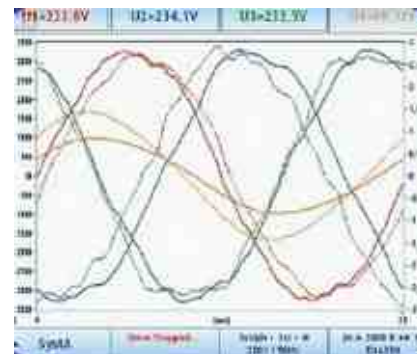
□ 应用场景5——储能应急式供电



应急供电



负荷保电



负荷曲线调整

目前移动式应急供电系统主要包括：

柴油发电车：技术成熟度高，应用最为广泛；

移动式飞轮储能系统：成本较高，多应用于重要会议、庆典；

移动式电池储能系统：发展迅速，多用于中小型供电场合。

8.4储能典型应用——用户侧应用

□ 应用场景5——储能应急式供电

移动式储能系统环境友好、灵活可靠，多用于负荷保电、城市电网应急等中小型用电场所，自**2012**年以来在福建、上海、江苏已有多地示范应用。

移动式储能系统具有无环境和噪声污染、系统投运和**启动时间短**、**电压、频率波动小**、**运维成本低**、支持功率双向流动，**并离网无缝切换**、支撑时间取决于电池和负荷特性等特点。



移动储能装置

8.4 储能典型应用——用户侧应用

□ 应用场景6——储能提高供电能力



光储充一体化



通信基站



港口岸电



工业园区

- 光储充一体化是比较普遍的应用场景，一方面缓解了充电高峰时充电桩大电流充电对区域电网的冲击，另一方面通过峰谷差价，给充电站带来了非常可观的收益。
- 基站储能电池需求巨大，中国铁塔公司在全国范围内现有近200万座基站，备电、削峰填谷、新能源站等合计需要电池约13600万kWh，每年新增储能电池需求约2500万kWh。
- 港口主要用电负荷集中在大功率、长时间工作的设备。江苏连云港拟在港口岸电系统中建设5MW储能电站，满足总量10MW以上以及单个泊位3MW以上岸电接入需求。
- 目前大多数用户侧储能项目都建设在工业园区内。江苏无锡星洲工业园内、江苏启东螺丝厂、食品工厂、污水处理厂、信义空调园区等也有安装储能设施。
- 除上面应用场景外，储能还可在数据中心、医院、学校等场所为配电网缓解压力、提升供电能力。

总结与展望

- 电池成组技术将电池单体通过成组方式组合成比电池单体能量等级更高的 电池模组，是大容量储能系统的核心技术之一；
- 根据实际要求，电池模组通过串并联的方式进行组合后与储能变流器连接，将直流电变为交流电，再通过升压变压器提高电压等级，经汇流后连接至高压母线上；
- 本章介绍了电池单体、电池模组、储能单元和储能电站4个等级电压功率等 电气参数推导；
- 本章介绍了储能电站示范工程中储能系统的集成方式、运行控制方式；
- 风电场、光伏电站等新能源发电站的出力具有较大的波动性，其并网发电后会引发电网出现电力平衡等一系列问题。为了平抑新能源出力的波动，可以在电网配置一定容量的储能，通过储能系统的充放电调节，减小新能源的出力波动；

总结与展望

- 在电力系统的运行调度过程中，电力调度中心需要为各个发电厂制定日发电计划。考虑到了新能源场站的随机间歇性，需要**加配储能电站**，并通过跟踪控制补偿**新能源场站实际功率与发电计划的差值**，以满足运行调度要求；
- 削峰填谷是储能在电力系统的一个重要应用场景。在电力负荷处于**低谷期**时，**电网向储能系统充电**；在电力负荷处于**高峰期**时，**储能系统向电网放电**。一般可以采用恒功率充放电和功率差充放电两种控制方式；
- 对储能电站内部的各个储能单元进行功率分配时，需要考虑每个储能单元的**电池荷电状态、待充放电功率**等因素的影响。根据实际情况可**分别采取均分法、比例法和SOC分区法**对每个储能单元的充放电功率进行分配。
- 储能在**发电侧**主要能够平滑新能源输出功率波动、跟踪计划出力等；在**电网侧**主要能够辅助火电厂**AGC**调频等；在**用户侧**主要能够储能应急式和供电提高供电能力等；

第9章 储能经济性分析

- 经济性分析概述
- 经济性分析原理
- 储能在电力系统的经济性分析
- 储能的梯次利用
- 总结与展望

9.1 经济性分析概述

□ 储能经济性分析的概念

储能的经济性分析一般以经济学为基础，计算某一储能项目详细的成本和收益情况，进而评估其经济性，为投资与运行决策提供依据。由于储能在电力系统甚至整个能源系统中具有特殊的地位，储能的经济性分析需要**兼顾经济、社会、环境**等因素。



9.1 经济性分析概述

□ 储能经济性分析的意义

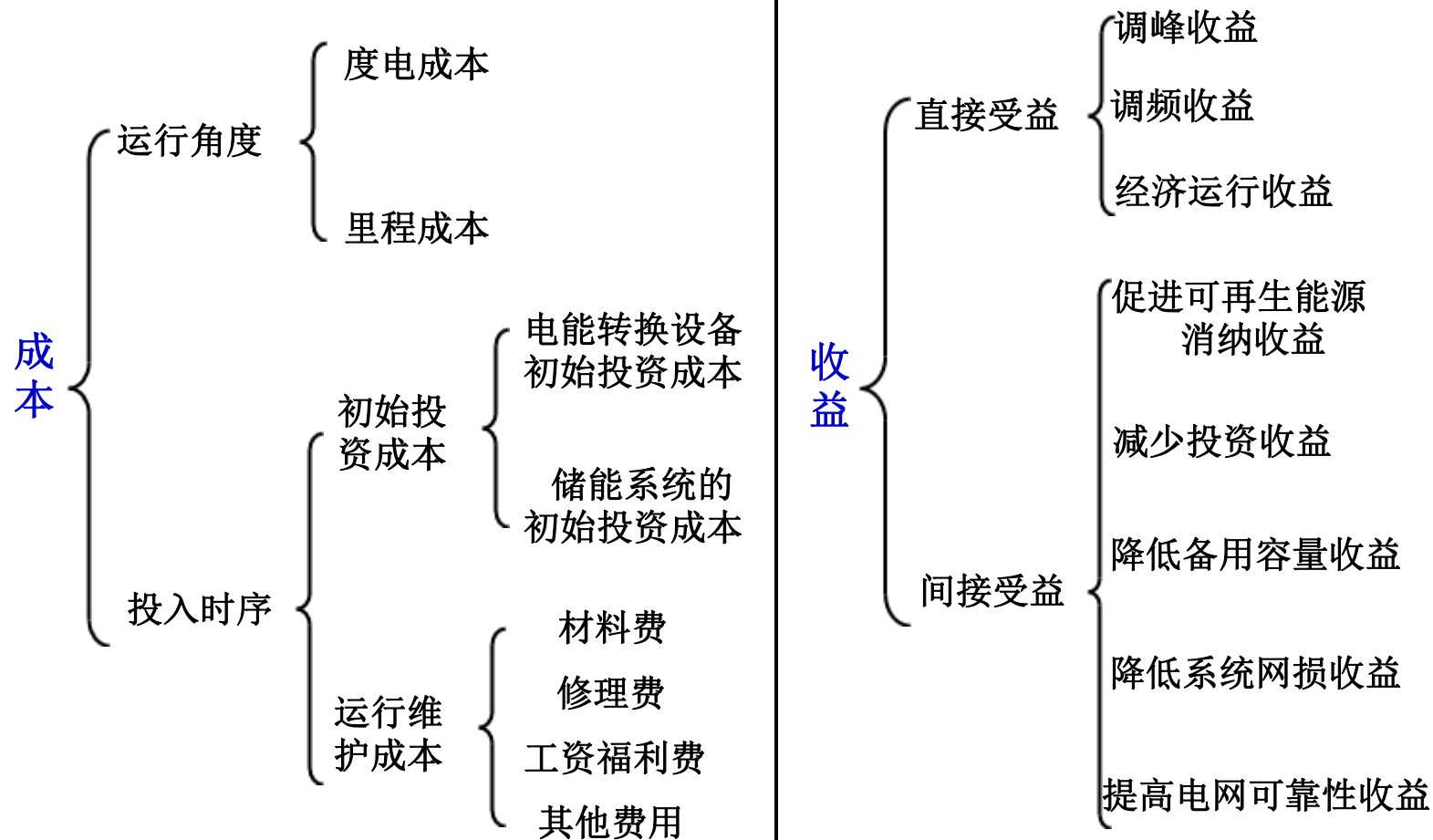
储能的经济性分析可以明晰储能项目的成本与收益情况，为储能的推广应用提供依据。

- 可以帮助储能从业者评估储能项目在运营周期内的**收益水平**，判断是否部署以及如何部署储能项目；
- 可以获得储能的**各项经济指标**，为储能政策、补贴标准、价格机制等提供参考；
- 能够明晰储能的**价值流向**，发挥储能的多功能特性，切实推动储能产业发展。

9.1 经济性分析概述

□ 储能经济性分析的要素

◆ 成本与收益



9.1 经济性分析概述

□ 储能经济性分析的要素

◆ 现金流量

1. 概念：

特定经济系统在一定时期内实际发生的**现金流出或现金流入**，称为现金流量。

- **现金流入**：流入该系统的现金，称为现金流入。常用 **CI** 表示。
- **现金流出**：流出该系统的资金，称为现金流出。常用 **CO** 表示。
- **净现金流量**：现金流入与现金流出的**差额**，称为净现金流量。常用 **CI-CO** 表示。

9.1 经济性分析概述

□ 储能经济性分析的要素

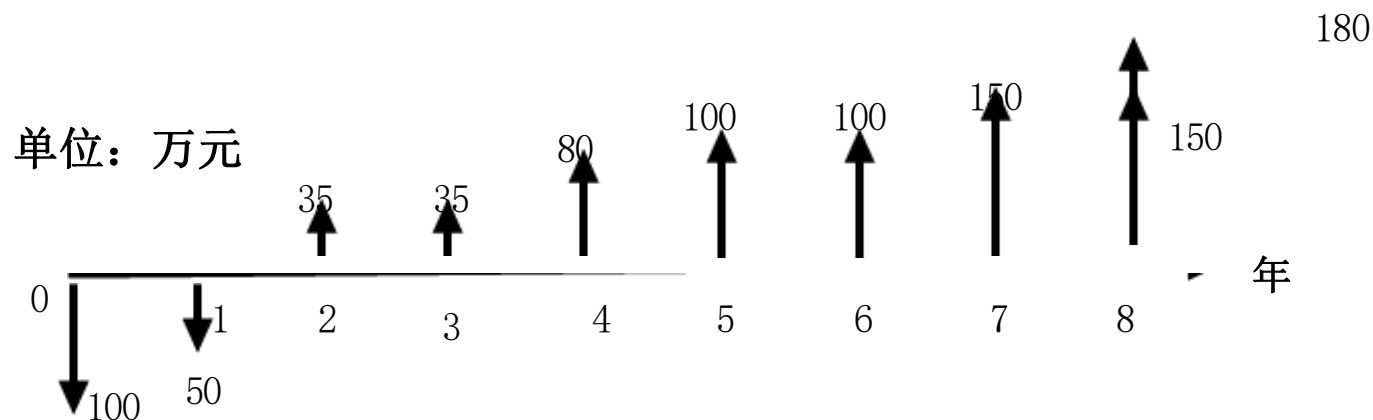
◆ 现金流量

2. 现金流量图：

为了直观、形象的表示建设项目或技术方案在**整个寿命期内**所有的现金流量与时间对应关系而采用的图形：

1 横坐标（轴）表示**时间**；时间轴

2 纵坐标（轴）表示**现金流量**。时间轴的垂直线（表示现金流出和现金流入，并注明金额）

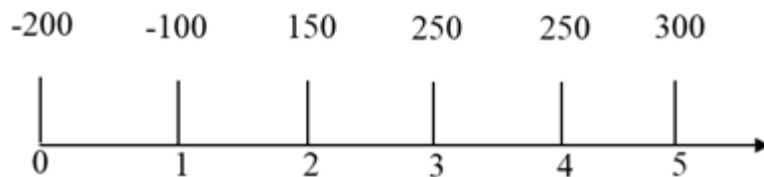
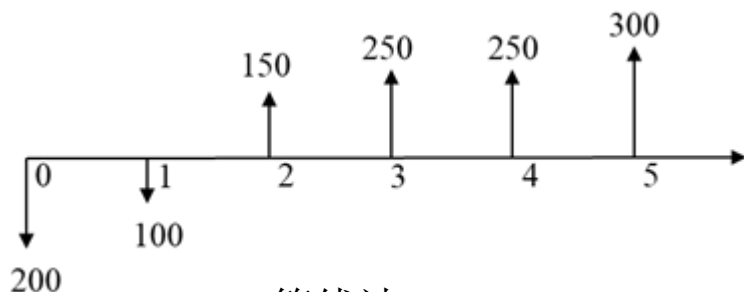


9.1 经济性分析概述

□ 储能经济性分析的要素

◆ 现金流量

例9-1：某建设项目第一年年初投资200万元，第二年年初又投资100万元，第二年投产，当年收入500万元，支出350万元，第三年至第五年现金收入均为800万元，支出均为550万元，第五年末回收资产余值50万元，画出该项目的净现金流量图。



9.1 经济性分析概述

□ 储能经济性分析的要素

◆ 资金时间价值及其等值计算

在考虑资金的时间价值因素后，不同时间点上数额不等的资金在一定的利率条件下具有相等的价值。

- **贴现与贴现率**：把将来某一时点处资金金额**折算**成现在时点的等值金额称为贴现或折现。贴现时所用的利率称贴现率或折现率，用 **i** 表示。
- **现值**：是指资金“**现在**”价值，用 **P** 表示。
- **终值**：现值在**未来某一时点**的资金金额称为终值或将来值，用 **F** 表示。
- **年值**：一定时期内每期有**等额收支**的资金值，用 **A** 表示。

影响资金等值的**因素**有三个：资金金额、资金发生时间和利率

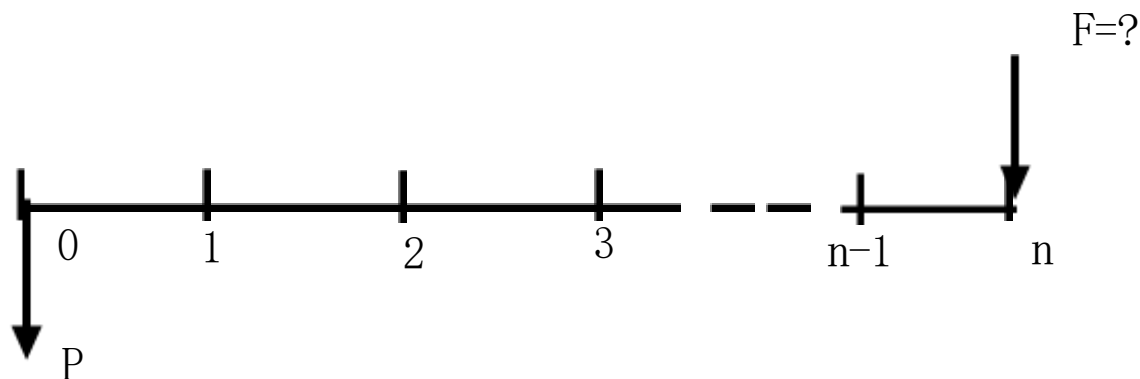
9.1 经济性分析概述

□ 储能经济性分析的要素

◆ 资金时间价值及其等值计算

1. 一次支付终值公式

本金**P**元，年利率**i**，**n**年后本利和为？



计算公式：

$$F = P \times (1 + i)^n$$

$$= P \times (F / P, i, n)$$

➡ $(1+i)^n$ 一次支付终值系数

9.1 经济性分析概述

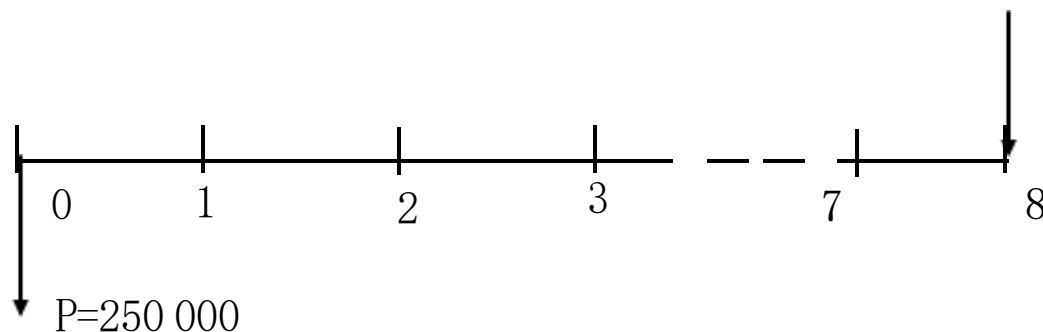
□ 储能经济性分析的要素

◆ 资金时间价值及其等值计算

1. 一次支付终值公式

例9-2：一份信托上规定有250 000元留给未成年的女儿，但是，暂由她的保护人保管8年。若这笔资金的利率是5%，问8年后这位女孩可以得到多少钱？

$F=?$



解： $F = P \times (1 + i)^n = 250000 \times (1 + 0.05)^8 = 369250$ 元

$F = P \times (F / P, i, n) = 250000 \times 1.477 = 369250$ 元

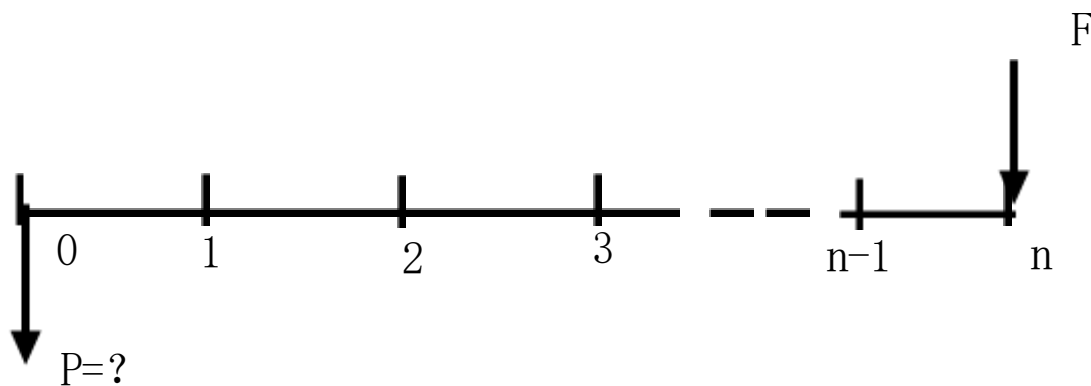
9.1 经济性分析概述

□ 储能经济性分析的要素

◆ 资金时间价值及其等值计算

2. 一次支付现值公式

n年后一笔资金F，年利率i，相当于现在？



计算公式：

$$\begin{aligned} P &= F \times (1+i)^{-n} \\ &= F \times (P / F, i, n) \end{aligned}$$



$1/(1+i)^{-n}$ 复利现值系数

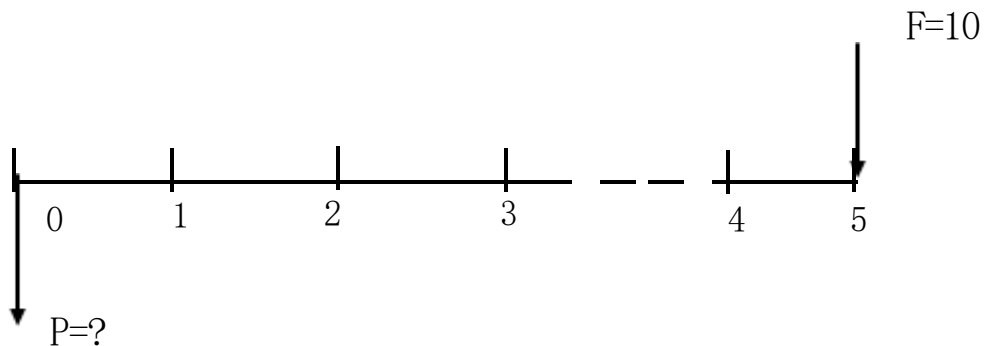
9.1 经济性分析概述

□ 储能经济性分析的要素

◆ 资金时间价值及其等值计算

2. 一次支付现值公式

例9-3：某刚刚参加工作的大学生欲筹备未来结婚费用，打算5年后从银行得到10万元，如果银行利率为12%，问现在应存入银行多少钱？



解：

$$P = F \times (1 + i)^{-n} = 10 \times (1 + 12\%)^{-5} = 5.67 \text{ 万元}$$

$$P = F \times (P / F, 12\%, 5) = 10 \times 0.5674 = 5.67 \text{ 万元}$$

9.1 经济性分析概述

□ 储能经济性分析的要素

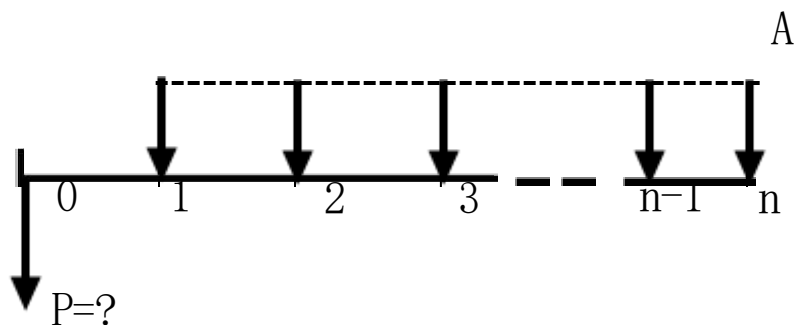
◆ 资金时间价值及其等值计算

3. 等额分付现值公式

从第1年末到n年末有一个等额现金序列**A** 当利率为*i*时，其现值是多少？

$$F = A \times \frac{(1+i)^n - 1}{i}$$

$$P = \frac{F}{(1+i)^n}$$



计算公式：

$$P = A \times \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$$



$$\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$$

等额分付现值系数

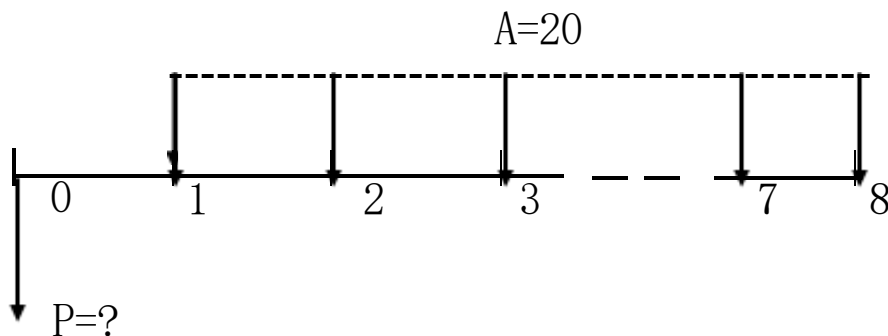
9.1 经济性分析概述

□ 储能经济性分析的要素

◆ 资金时间价值及其等值计算

3. 等额分付现值公式

例9-4： 有一家小饭店要出租，合同期为8年，预计年净收益20万元，若投资者要求的收益率为20%，问投资者最多愿意出多少价格租小饭店？



解：

$$\begin{aligned} P &= A \times (P / A, i, n) \\ &= 20 \times (P / A, 20\%, 8) \\ &= 20 \times 3.837 = 76.74 \text{ (万元)} \end{aligned}$$

9.2 经济性分析原理

□ 投资回收期法

是指投资回收的期限。也就是投资方案所产生的净现金收入回收初始全部投资所需的时间。通常用“年”表示。

- 静态投资回收期：不考虑资金时间价值因素。
- 动态投资回收期：考虑资金时间价值因素。
- 投资回收期 (T_p , 以年表示), 计算公式:

$$\sum_{t=0}^{T_p} (CI - CO)_t = 0 \quad \Rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{ll} CI & \text{现金流入量} \\ CO & \text{现金流出量} \\ (CI - CO)_t & \text{第}t\text{年的净现金流量} \end{array} \right.$$

9.2 经济性分析原理

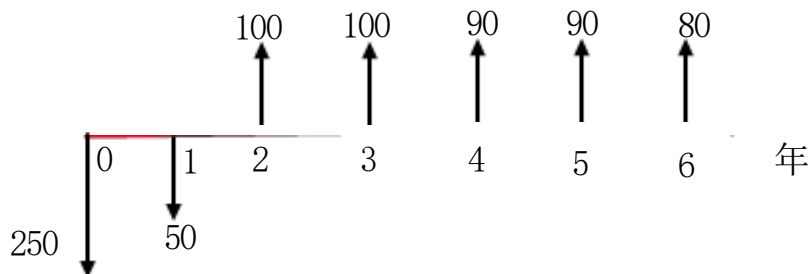
□ 投资回收期法

◆ 静态投资回收期

投资分几次，投产后隔年净现金流不同，计算公式：

投资回收期 T_p = 累计净现金流量开始出现正值的年份 - 1

$$+ \frac{|\text{上年累计净现金流量}|}{\text{当年净现金流量}}$$



净现金流量

-250	-50	100	100	90	90	80
------	-----	-----	-----	----	----	----

累计净现金流量

-250	-300	-200	-100	-10	80	160
------	------	------	------	-----	----	-----

$$T_p = 5 - 1 + \frac{|-10|}{90} = 4.1 \text{ 年}$$

9.2 经济性分析原理

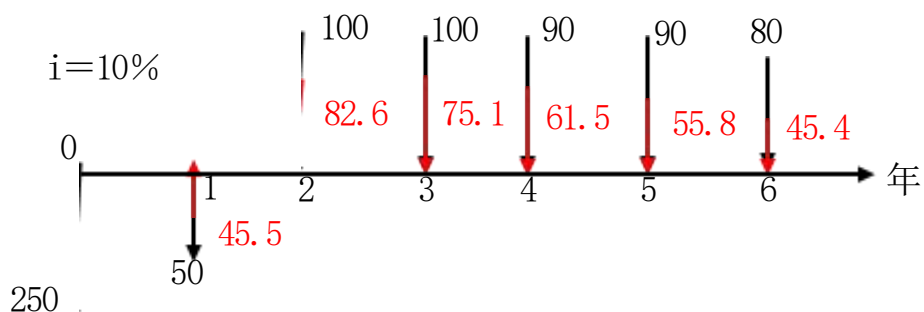
□ 投资回收期法

◆ 动态投资回收期

投资分几次，投产后隔年净现金流不同，计算公式：

投资回收期 T_p = 累计净现金流量折现值开始出现正值的年份 - 1

$$+ \frac{|\text{上年累计净现金流量折现值}|}{\text{当年净现金流量折现值}}$$



净现金流量

-250	-45.5	82.6	75.1	61.5	55.8	45.4
------	-------	------	------	------	------	------

累计净现金流量
折现值

-250	-295.5	-212.9	-137.8	-76.3	-20.4	25
------	--------	--------	--------	-------	-------	----

$$T_p = 6 - 1 + \frac{|-20.4|}{45.4} = 5.5 \text{ 年}$$

9.2 经济性分析原理

□ 投资回收期法

◆ 判别方式

采用投资回收期进行方案评价时，应将计算的投资回收期 T_p 与**标准的投资回收期 T_b** 进行比较：

- $T_p \leq T_b$ 该方案是**合理的**，说明方案投资利用效率高于行业基准收益率。
- $T_p > T_b$ 该方案是**不合理的**，说明方案投资利用效率低于行业基准收益率。

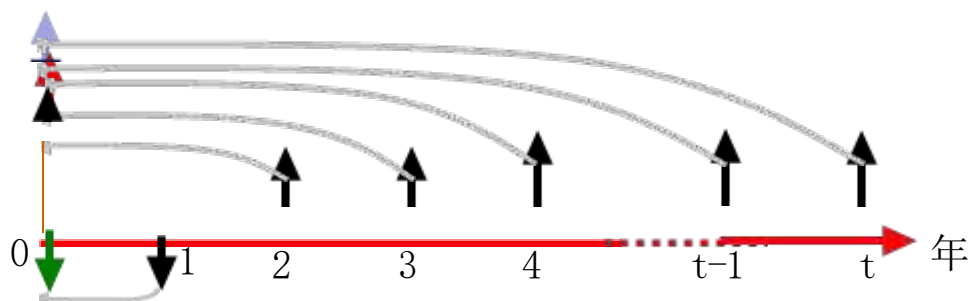


9.2 经济性分析原理

□ 净现值法

指项目（或方案）在寿命期内各年的净现金流量 $(CI - CO)_t$ ，按照一定的折现率 i ，折现到期初时点的现值之和，其表达式为：

$$NPV = \sum_{t=0}^n (CI - CO)_t \times (1 + i)^{-t}$$

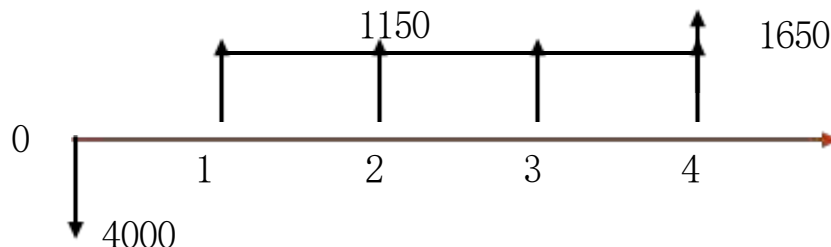


判别准则：若 **NPV** ≥ 0 ，则方案是经济合理的；反之若 **NPV** < 0 ，则方案应予否定

9.2 经济性分析原理

□ 净现值法

例9-5：某设备的购价为4000元，每年的运行收入为1500元，年运行费用350元，4年后该设备可以按500元转让，如果基准收益率 $i_0=20\%$ ，问此项设备投资是否值得？



解：按净现值NPV指标进行评价：

$$\begin{aligned} \text{NPV}(20\%) &= -4000 + (1500 - 350) \times (P/A, 20\%, 4) \\ &\quad + 500 (P/F, 20\%, 4) \\ &= -781.5 (\text{元}) \end{aligned}$$

由于 $\text{NPV}(20\%) < 0$ ，此投资经济上不合理。

9.2 经济性分析原理

□ 净现值法

在上例中，若其他情况相同，如果基准收益率 $i_0=10\%$ 和 $i_0=5\%$ ，问此项投资是否值得？

解：

$$\begin{aligned} \text{NPV}(10\%) &= -4000 + (1500 - 350) \times (P/A, 10\%, 4) + 500 \times (P/F, 10\%, 4) \\ &= 13 (\text{元}) \\ \text{NPV}(5\%) &= -4000 + (1500 - 350) \times (P/A, 5\%, 4) + 500 \times (P/F, 5\%, 4) \\ &= 489.5 (\text{元}) \end{aligned}$$

这意味着若基准收益率为5%和10%，此项投资是盈利的。

9.2 经济性分析原理

□ 内部收益率法

内部收益率(**IRR**)简单地说就是净现值**NPV**为零时的折现率。其表达式为：

$$NPV = \sum_{t=0}^n (CI - CO)_t \times (1 + IRR)^{-t} = 0$$

➤ 经济含义：在项目寿命期内项目内部未收回投资每年的净收益率。

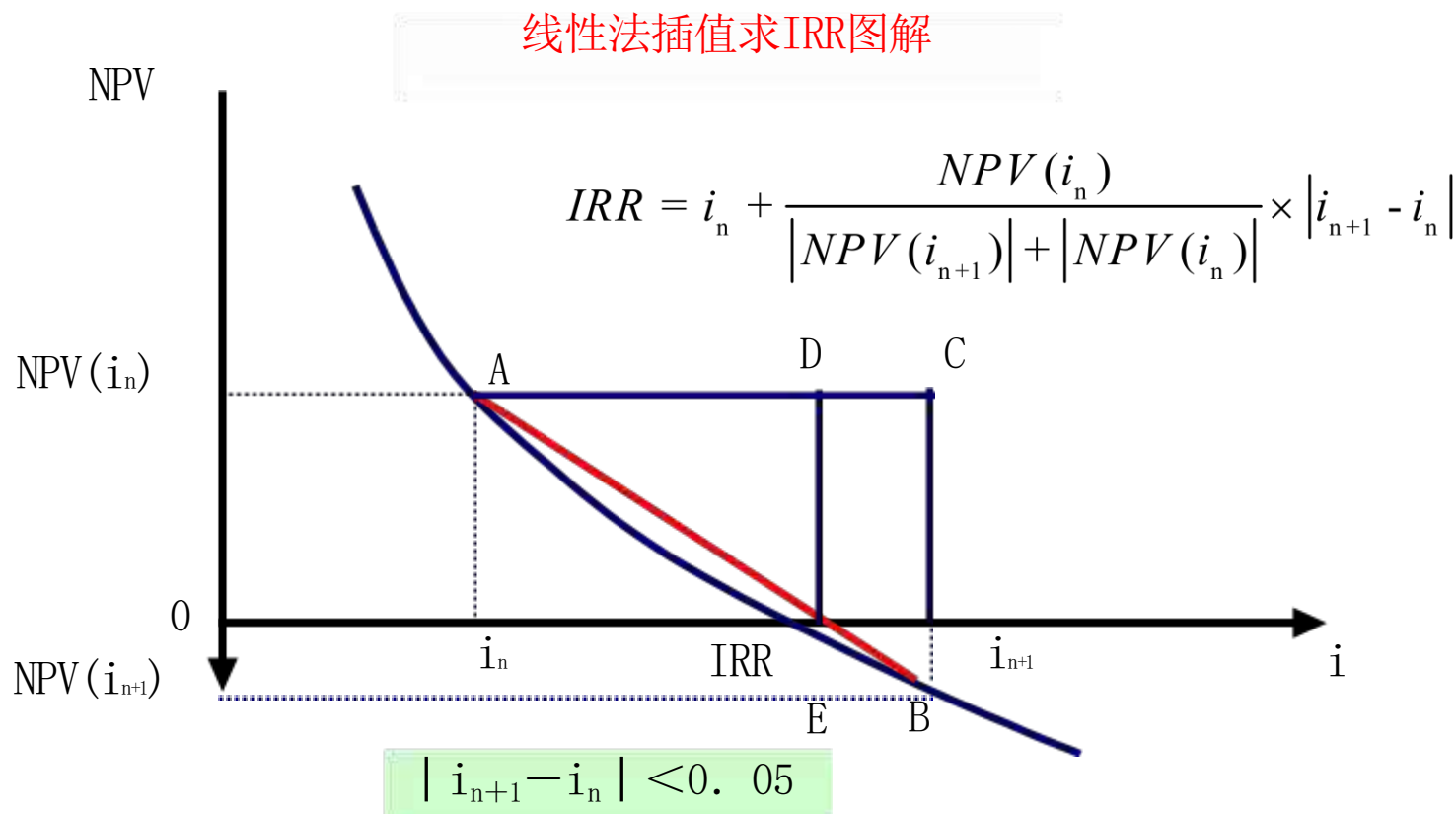
或者：投资的赢利率，表明资金的使用效率。

➤ 净现值法必须事先设定一个折现率，内部收益率指标则**不事先**设定折现率，它将求出项目实际能达到的**投资效率**(即内部收益率)。

9.2 经济性分析原理

□ 内部收益率法

由于内部收益率方程通常为高次方程，不易求解，因此一般采用“线性插值法”（试算内插法）求IRR的近似值。



9.2 经济性分析原理

□ 内部收益率法

◆ 判别方式

设基准收益率为 i_0 ，用内部收益率指标 IRR 评价方案的判别准则是：

- 若 $IRR \geq i_0$ ，则项目在经济效果上可以接受；
- 若 $IRR < i_0$ ，则项目应予否定。

一般情况下，对于单个方案的评价，内部收益率 IRR 准则与净现值 NPV 准则，其评价结论是一致的。



9.2 经济性分析原理

□ 内部收益率法

例9-6： 对于一个寿命周期为5年的小型储能项目，其初始投资10000元，前4年中每年年末的收益为3000元，第5年年末的收益为5000元。基准折现率为10%，试用内部收益率法分析该方案是否可行。

现金流量表

单位：万元

年份	0	1	2	3	4	5
现金流量	-2000	300	500	500	500	1200

解：试算 $i_1=12\%$ 时，

$$NPV(i_1) = -2000 + 300(P/F, 12\%, 1) + 500(P/A, 12\%, 3)(P/F, 12\%, 1) + 1200(P/F, 12\%, 5) = 21 \text{ (万元)} > 0$$

试算 $i_2=14\%$ 时，

$$NPV(i_2) = -2000 + 300(P/F, 14\%, 1) + 500(P/A, 14\%, 3)(P/F, 14\%, 1) + 1200(P/F, 14\%, 5) = -95 \text{ (万元)} < 0$$

可见， IRR 在 $12\% \sim 14\%$ 之间

$$IRR = i_1 + \frac{NPV_1}{NPV_1 + |NPV_2|} (i_2 - i_1) = 12\% + \frac{21}{21+95} \times (14\% - 12\%) \approx 12.4\%$$

由于 $IRR=12.4\%>10\%$ ，该方案可行。

9.3 储能在电力系统的经济性分析

□ 储能在发电侧的经济性分析

在发电侧，储能主要具有两种应用模式：一是与**火电联合**运行，比如广东、山西等地的火储联合调频服务；二是与**可再生能源联合**运行，比如青海、新疆等地通过配置储能消纳新能源。



火电：运行灵活性不足、污染环境



可再生能源：间歇性、波动性和随机性，并网消纳困难

9.3 储能在电力系统的经济性分析

□ 储能与火电联合运行

◆ 火电和储能联合运行的作用：

- 弥补火电机组灵活性不足的短板，使“火储”作为整体更好地参与电力系统的调峰、调频服务；
- 利用储能应对负荷波动，使火电机组保持在经济运行状态，同时避免机组的频繁启停，减少机组损耗、降低维护成本；
- 利用储能的“低储高发”特性增加系统在高峰时刻的供电能力，起到延缓新建电厂甚至避免新建电厂的作用。



9.3 储能在电力系统的经济性分析

□ 储能与火电联合运行

◆ 成本分析

在寿命周期内，储能的成本包括：初始投资成本、运行维护成本、置换成本和废弃处置成本。

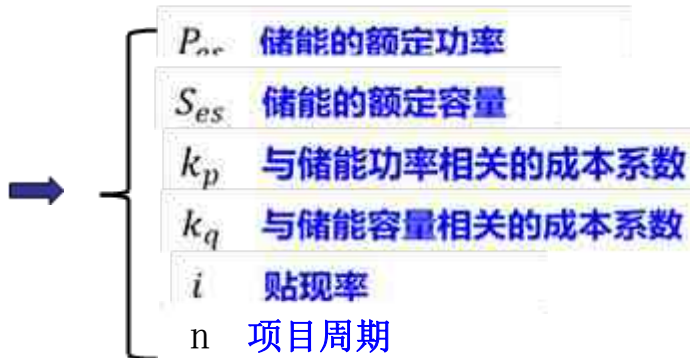
1. 初始投资成本

储能的初始投资成本由电能转换设备成本和储能系统成本构成，可按储能的**额定功率和额定容量**进行估算，即

$$C_1 = k_p P_{es} + k_q S_{es}$$

对总初始投资成本在**项目周期内进行分摊**，可得年均投资成本 C_{1_ann} ，即

$$C_{1_ann} = (k_p P_{es} + k_q S_{es}) \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

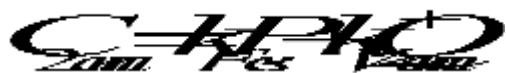


9.3 储能在电力系统的经济性分析

□ 储能与火电联合运行

2. 运行维护成本

储能系统的年运行维护成本由运行成本和**维护成本**构成。运行成本与储能系统每年释放的电能有关；维护成本则由定期的人工维护、人工巡检等产生，即



$$\left\{ \begin{array}{l} k_F \text{ 储能系统固定运行维修价格} \\ k_V \text{ 储能系统的放电电价} \\ Q \text{ 储能系统的计放电量} \end{array} \right.$$

3. 置换成本

置换成本是指当电池储能寿命周期小于实际项目周期时，每次**更换电**
池 本体所产生的费用之和，即

$$C_3 = k_q S_{es} \sum_{\beta=1}^{\tau} \frac{(1-\alpha)^{\beta a}}{(1+i)^{\beta a}}$$

项目周期内的年均置换成本：

$$C_{3_ann} = k_q S_{es} \sum_{\beta=1}^{\tau} \frac{(1-\alpha)^{\beta a}}{(1+i)^{\beta a}} \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^{n-1}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha \text{ 为电池储能安装成本的年均下降比} \\ \tau \text{ 例 为电池本体的更换总次数} \\ a \text{ 为电池储能寿命周期} \\ \beta \text{ 为电池本体更换次数的次序} \end{array} \right.$$

9.3 储能在电力系统的经济性分析

□ 储能与火电联合运行

5. 废弃处置成本

废弃处置成本指储能设备的寿命周期结束后，为处理该设备所需支付的费用，包括设备残值和环保费用支出，即

$$C_4 = (C_{en} - \gamma C_1) \sum_{\beta=1}^{\tau} \frac{1}{(1+i)^{\beta a}}$$

项目周期内的年均废弃处置成本：

$$C_{4_ann} = (C_{en} - \gamma C_1) \sum_{\beta=1}^{\tau} \frac{1}{(1+i)^{\beta a}} \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$



C_{en} 环境无害化处理成本

γ 电池本体的回收系数——铅炭电池的 γ 可取为20%，锂电池的 γ 一般取为0。

9.3 储能在电力系统的经济性分析

□ 储能与火电联合运行

◆ 收益分析

火储联合运行可以改善火电机组的灵活性，在调峰、调频、经济运行收益、减少新建机组投资等方面产生收益。

1. 调峰收益

配置在火电侧的储能系统的年调峰收益为

$$I_{g1_ann} = p_{pr} \sum_{d=1}^{D_{pr}} Q_{pr}^{+}(d) \quad \rightarrow \quad \begin{cases} Q_{pr}^{+}(d) & \text{储能在第} d \text{天内的调峰放电电量} \\ p_{pr} & \text{调峰补偿电价} \\ D_{pr} & \text{一年内储能调峰运行天数。} \end{cases}$$

2. 调频收益

配置在火电侧的储能系统的年调频收益为

$$I_{g2_ann} = \sum_1^{12} \sum_{x=1}^{X_{fm}} (M_{fm}(x) I_{fm}(x) Kap_{fm}(x))$$



X_{fm}	每月调频市场总交易周期数
$M_{fm}(x)$	第x个交易周期储能提供的调频里程
$I_{fm}(x)$	第x个交易周期的调频里程补偿
$Kap_{fm}(x)$	第x个交易周期的综合调频性能指标平均值

9.3 储能在电力系统的经济性分析

□ 储能与火电联合运行

3. 经济运行收益

配置在火电侧的储能系统，其经济运行收益可由减少机组损耗成本和减少机组维护成本来衡量。

1) 减少的机组损耗成本：

$$I_{loss_ann} = I_{ther} \Delta A \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad \rightarrow \quad \begin{cases} I_{ther} & \text{火电机组年平均运行收益} \\ \Delta A & \text{配置储能后机组运行寿命的延长} \end{cases}$$

2) 减少的年运行维护成本：

$$I_{om_ann} = \Delta k_{om} C_g \quad \rightarrow \quad \begin{cases} \Delta k_{om} & \text{投入储能前后火电机组的运行维护成本费用系数之差} \\ C_g & \text{火电机组的初始投资成本} \end{cases}$$

3) 火储联合系统的经济运行收益为：

$$I_{g3_ann} = I_{loss_ann} + I_{om_ann}$$

9.3 储能在电力系统的经济性分析

□ 储能与火电联合运行

4. 减少投资收益

配置在火电侧的储能系统，其年均减少投资收益可由提供辅助服务所减少的火电装机成本来衡量，即

$$I_{g4_ann} = C_{ther} \frac{\sum_{d=1}^{D_{anc}} P_{anc}^+(d)}{Tq} \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$



T	火电机组的年运行时间
C_{ther}	单位容量装机成本
D_{anc}	一年内储能参与辅助服务的运行天数
$P_{anc}^+(d)$	储能第 d 天内的参与辅助服务的总放电电量
q	火电基本参与辅助服务能力与最大出力的比值

9.3 储能 在电力系统的经济性分析

例9-7 建立一个9MW/4.5MWh的磷酸铁锂电池储能电站辅助火电厂调频。储能电站的初始投资成本为2800万元，电网调度向火电厂调频提供的补偿为6元/MW，典型日AGC指令见表9-4，调频性能指标见表9-5。忽略运行过程中产生的其他成本，且仅考虑发电侧储能电池的调频效益。试求：

- 1 首年火储联合调频系统的收益；
- 2倘若从第二年开始，每年的调频效益下降3%，试求该储能系统投资的静态回收期。

表9-4 加入储能系统后典型日AGC指令统计

典型日	夏季	冬季	春秋季
日调频里程/MW	1332	1320	927
持续天数/天	95	75	150

表9-5 加入储能系统后调频性能指标

典型日	调节速率（k1）	调节速率（k2）	调节速率（k3）	综合调频性能指标平均值（K）
夏季	4.01~4.62	0.91~1.00	0.89~1.00	2.45~2.81
冬季	4.10~4.64	0.93~1.00	0.91~1.00	2.51~2.82
春秋季	4.17~4.52	0.94~1.00	0.92~1.00	2.55~2.76

9.3 储能在电力系统的经济性分析

解：

(1) 调频收益

1) 夏季的调频收益：



2) 冬季的调频收益：



3) 春秋两季的调频收益：



4) 首年的调频总收益：



9.3 储能在电力系统的经济性分析

(2) 投资回收期

1) 最理想情况:

最理想情况的现金流量表

年份	0	1	2	3	4	5
初始投资	2800					
调频收益		611.1	592.8	575.0	557.7	541.0
净现金流量	-2800	611.1	592.8	575.0	557.7	541.0
累计现金净流量	-2800	-1788.9	-1196.1	-621.1	-63.4	77.6

$$T_P = 5 - 1 + \frac{463.4}{541.0} = 4.9 \text{ (年)}$$

2) 最不利情况:

最不利情况的现金流量表

年份	0	1	2	3	4	5	6
初始投资	2800						
调频收益		547.8	531.4	515.4	500.0	485.0	470.4
净现金流量	-2800	547.8	531.4	515.4	500.0	485.0	470.4
累计现金净流量	-2800	-2252.2	-1720.8	-1205.4	-705.4	-220.4	250

$$T_P = 6 - 1 + \frac{220.4}{470.4} = 5.5 \text{ (年)}$$

9.3 储能在电力系统的经济性分析

◆ 储能与火电联合运行的典型应用

截至**2020**年，全球有**20余个**国家在建或投运了超过**200**项兆瓦级储能调频项目。下表展示了国内外火储联合运行的一些典型案例。

序号	项目名称	储能配置	储能主要功能
1	内蒙古新丰热电公司储能项目	磷酸铁锂电池： 9MW/4.478MWh	调峰、调频、无功补偿、提高电能质量、提高供电可靠性等
2	河北建投宣化热电公司储能项目	磷酸铁锂电池： 9MW/4.5MWh	调峰、调频、无功补偿、提高电能质量、提高供电可靠性等
3	南加州爱迪生公司燃气轮机储能混合发电项目	锂电池： 10MW/4.2MWh	提高调频响应能力、延长机组寿命、减少运行成本等
4	北京石景山热电厂火储联合运营项目	磷酸铁锂电池： 2MW/0.5MWh	提高调频响应能力、延长机组寿命、减少运行成本等
5	山西京玉电厂储能项目	锰酸锂电池： 9MW/4.5MWh	提高调频响应能力、延长机组寿命、减少运行成本等
6	华润电力唐山丰润公司火储联合运营项目	三元锂电池： 9MW/4.5MWh	提高调频响应能力、延长机组寿命、减少运行成本等

9.3 储能在电力系统的经济性分析

□ 储能与可再生能源联合运行

◆ 储能与可再生能源联合运行的作用：

- 通过储能与可再生能源联合运行，可以使原本难以控制的可再生能源发电出力可控，进而**提高可再生能源的消纳率**。
- 储能与可再生能源联合运行时，也可以作为整体参与调峰、调频等**辅助服务**，获取额外收益。
- 在可再生能源侧装设储能系统后，可**减少**可再生能源场站所需**备用容量**，并**节省并网通道建设投入**。



9.3 储能在电力系统的经济性分析

□ 储能与可再生能源联合运行

◆ 成本分析

与配置在火电侧的储能系统一致，可再生能源侧储能的全寿命周期成本也 包括初始投资成本、运行维护成本、置换成本和废弃处置成本。详见书中 式(9-16)-(9-22)。

◆ 收益分析

储能与可再生能源联合系统的收益包括：促进可再生能源消纳收益、提高 系统可靠性收益、调峰收益、调频收益和降低备用容量收益。

1. 促进可再生能源消纳收益

配置在可再生能源侧的储能系统，其促进可再生能源消纳的年均收益由 减少可再生能源浪费的年均收益来衡量，即

$$I_{ng1_ann} = (E_{wrer} - E_{wrer_ess})E_p$$

E_{wrer}	储能接入前可再生能源浪费的年期望
E_{wrer_ess}	一年内储能参与辅助服务的运行天数
E_p	电价年期望

9.3 储能在电力系统的经济性分析

□ 储能与可再生能源联合运行

2. 调峰收益

配置在可再生能源侧的储能系统，其调峰收益与火电侧储能类似，可参考书本式(9-23)。

3. 调频收益

配置在可再生能源侧的储能系统，其调频收益与火电侧储能类似，可参考书本式(9-24)。

4. 降低备用容量收益

配置在可再生能源侧的储能系统，其降低备用容量收益为

$$I_{ng4_ann} = \sum_{d=1}^{365} k_{spa} S_{spa}(d) \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$



k_{spa} 备用容量价格
 $S_{spa}(d)$ 典型日可再生能源的总备用容量

9.3 储能在电力系统的经济性分析

例9-8 某光伏电站拟配置额定功率为15.79 MW、额定容量为4.31 MWh的磷酸铁锂储能系统。该储能系统的参数见表9-9。配置储能系统后，光伏的年浪费期望由接入前的887.999 MWh降低到239.648 MWh，系统的年调峰调频收益为170500 “USD”。假设储能系统的寿命为20年，试求配置储能所产生的成本与收益，并确定投资该储能项目的净现值（仅考虑初始投资成本及运行维护成本）。

表9-9 电池储能系统参数

参数	取值
k_v	30 USD/MWh
k_F	50 USD/MW
k_p	500000 USD/MW
k_q	600000 USD/MWh
k_{spa}	3500 USD/MWh
E_p	250 USD/MWh
Q_{ung}^-	14.4645 MWh
S_{spa}	0.40 MWh
i	0.03

9.3 储能在电力系统的经济性分析

- 解：
- 1 储能项目的全寿命周期成本
- 1) 初始投资成本：

$$C_1 = 5 \times 10^4 \times 15.79 + 6 \times 10^4 \times 4.31 = 1.0481 \times 10^6 \text{USD}$$

- 2 运行维护成本：

$$C_2 = [50 \times 15.79 + 30 \times 14.4645] \times (P/A, 3\%, 20) = 1.8202 \times 10^4 \text{USD}$$

- 3 总成本：

$$C_{total} = C_1 + C_2 = 1.0663 \times 10^6 \text{USD}$$

- 2 储能项目的全寿命周期收益
- 3 促进可再生能源消纳的经济收益：

$$I_1 = 250 \times (887.999 - 239.648) \times (P/A, 3\%, 20) = 2.4115 \times 10^6 \text{USD}$$

$$I_2 = 170500 \times (P/A, 3\%, 20) = 2.6036 \times 10^6 \text{USD}$$

9.3 储能在电力系统的经济性分析

3) 降低备用容量收益:

$$I_3 = 3500 \times 365 \times 0.40 \times (P/A, 3\%, 20) = 7.6024 \times 10^6 \text{USD}$$

4) 总收益:

$$I_{total} = I_1 + I_2 + I_3 = 1.2618 \times 10^7 \text{USD}$$

(3) 净现值

$$NPV_1 = 1.2618 \times 10^7 - 1.0663 \times 10^7 = 1.9550 \times 10^6 \text{USD}$$

9.3 储能在电力系统的经济性分析

◆ 储能与可再生能源联合运行的典型应用

为提升**可再新能源的消纳率**，多数国家强制要求新能源发电项目配置储能，下表列举了国内外一些具有代表性的储能与可再生能源联合运行示范项目。

序号	项目名称	储能配置	储能主要功能
1	张北国家风光储输示范工程	一期20MW，二期50MW；包括锂电池、铅酸电池、钛酸锂电池、液流电池、超级电容等	平滑出力、计划跟踪、调峰、调频、调压等
2	国电和风北镇储能型风场项目	5MW*2h磷酸铁锂电池，2MW*2h全钒液流电池，1MW*2min超级电容	平滑出力、计划跟踪、调峰、调频、调压等
3	美国西弗尼亚州风储联合运营项目	锂离子电池：32MW/8MWh	平滑出力、参与系统调频
4	南澳Hornsedale风储联合运营项目	Tesla锂电池：100MW/129MWh	平滑出力、计划跟踪、事故备用、调峰、调频、调压等
5	格尔木时代新能源光储联合电站	磷酸铁锂电池：15MW/18MWh	提升光伏消纳水平、调频、调压等
6	意大利南部可再生能源储能项目	钠硫电池：35MW/230MMh	提高可再生能源消纳率，减少线路阻塞，参与系统调频等

9.3 储能在电力系统的经济性分析

□ 储能在电网侧的经济性分析

◆ 电网侧配置储能的作用：

- 在外部设备的辅助下，可以调整线路的无功功率，实现**动态补偿**。
- 双向调节系统功率，实现对电网的快速、灵活调节，进而提高系统的**调峰、调频能力**。
- 通过储能的调节，可以优化系统潮流，**降低**调度周期内的**电网损耗**。
- 在电网发生故障时，储能可以提供无功电压支撑，并作为**事故后备电源**，全面提高电网的可靠性。
- 可以缓解特定时段的线路拥堵，起到**延缓线路扩容**的作用。



9.3 储能在电力系统的经济性分析

□ 储能在电网侧的经济性分析

◆ 成本分析

与发电侧储能一致，电网侧储能全寿命周期成本也包括初始投资成本、运行维护成本、置换成本和废弃处置成本，详见书本公式(9-16)-(9-22)。

◆ 收益分析

电网侧储能的收益主要包括：调峰收益、调频收益、降低系统网损收益、提高电网可靠性收益和延缓电网升级扩容收益。

1. 调峰收益

配置在电网侧的储能系统，其调峰收益与发电侧储能类似，可参考书本公式(9-23)。

2. 调频收益

配置在电网侧的储能系统，其调频收益与发电侧储能类似，可参考书本公式(9-24)。

9.3 储能在电力系统的经济性分析

□ 储能在电网侧的经济性分析

3. 降低系统网损收益

储能“低储高发”会造成功率的双向流动，增加网损；同时，储能可以优化系统潮流，降低网损。综合考虑，可得储能降低系统网损的年收益：

$$I_{grid3_ann} = 365 \sum_{i=1}^{24} p_{loss} \left(P_{loss}(t) - P_{loss_ess}(t) \right)$$

p_{loss}	网损电价
$P_{loss}(t)$	加入储能前的系统网损
$P_{loss_ess}(t)$	加入储能后的系统网损

4. 提高电网可靠性收益

配置在电网侧的储能系统，其提高电网可靠性投资收益为


$$I_{grid4_ann} = E_{grid} (O_{grid} - O_{grid_ess})$$

O_{grid}	未安装储能系统电网的年平均故障停电时间
O_{grid_ess}	安装储能系统后电网的年平均故障停电时间
E_{grid}	单位故障停电时间带来的经济损失期望

5. 延缓电网升级扩容收益

配置在电网侧的储能系统，延缓电网升级扩容的年均收益为

$$I_{grid5_ann} = C_{equi} S_{grid} \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

C_{equi}	配电设备单位容量造价
S_{grid}	安装储能系统后延缓的电网升级扩容容量

9.3 储能在电力系统的经济性分析

例9-9 已知某储能电站的工程总规模为24MW/48MWh，规划周期为20年，配置储能电站后可延缓电网扩容31.5MWh。假设储能单位功率成本为60万元/MW，单位容量成本为170万元/MWh，年运行费用为88万元，系统单位容量扩建成本为200万元/MWh，网损电价为0.3元/kWh。配置储能后，每年提高电网可靠性投资收益11万元，调峰调频收益25万，基准收益率为6%，配置储能前后的网损如表9-11所示。试求该项目的净现值。

表6 某日网损情况 (MW)

时间	0-7h	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18-24h
无储能	1.2	9.6	11	13	11.5	13.2	13	9	9.8	8.4	8.4	1.4
配置储能	0.8	8	9	10	9	11	11	6	7	6	7	1.0

解：

(1) 储能项目成本现值

1) 投资成本：

$$C_1 = 24 \times 60 + 48 \times 170 = 6900 \text{ (万元)}$$

2) 运维成本：

$$C_2 = 88 \times (P/A, 6\%, 20) = 88 \times 11.47 = 1009.36 \text{ (万元)}$$

9.3 储能在电力系统的经济性分析

2 储能项目收益现值

1) 调峰调频收益:

$$I_1 = 25 \times (P/A, 6\%, 20) = 286.75 \text{ (万元)}$$

2 降低系统网损收益:

$$I_2 = 0.3 \times 28.5 \times 365 \times 1000 \times (P/A, 6\%, 20) / 10000 = 3579.50 \text{ (万元)}$$

3 提高电网可靠性投资收益:

$$I_3 = 11 \times (P/A, 6\%, 20) = 126.17 \text{ (万元)}$$

4 延缓电网升级扩容收益:

$$I_4 = 200 \times 31.5 = 6300 \text{ (万元)}$$

(2) 储能项目的净现值:

$$NPV = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 - C_1 - C_2 = 2383.06 \text{ (万元)}$$

9.3 储能在电力系统的经济性分析

◆ 电网侧储能的典型应用

近年来，随着分布式电源、微电网、智能用电、电动汽车等的快速发展，**电网侧储能迎来蓬勃发展之势**。下表列举了国内外电网侧的储能典型应用实例。

序号	项目名称	储能配置	储能主要功能
1	美国chemical 储能电站	由20组50kW的钠硫电池模块组成，总容量为60kWh	削峰填谷、缓解线路阻塞、提高供电可靠性等
2	湄洲岛储能电站	磷酸铁锂电池：1MW/2MWh	削峰填谷、提高电能质量、事故备用电源等
3	深圳宝清电池 储能电站	锂电池：6MW/18MWh	支撑孤岛运行、调频、调压、热备用等
4	贵州安顺电池 储能电站	磷酸铁锂电池：70kW/140kWh	解决供电半径过长、低电压问题，削峰填谷，充当事故备用应急电源
5	深圳供电局110千伏潭头变电站储能装置	磷酸铁锂电池：5MW/10MWh	缓解供电受限问题、提高供电可靠性、提供旋转备用、调压等
6	福建电科院移动储能 电站	磷酸铁锂电池：250kW/500kWh	直流热力融冰、应急保供电、提高配电台区供电能力等

9.3 储能在电力系统的经济性分析

□ 储能在用户侧的经济性分析

◆ 用户侧配置储能的作用：

- 利用储能的“低储高发”性能降低整体用电成本。
- 由于储能用电高峰期可充当电源，安装储能后可以减小用户用电功率的最高值，进而降低容量费用。
- 在发生停电故障期间，安装了储能的用户仍可利用储能进行电力供应，避免停电现象，提高供电可靠性。
- 在短期故障情况下，储能可以保证电能质量，减少电压波动、频率波动、功率因数、谐波以及秒级到分钟级的负荷扰动对电能质量的影响。



9.3 储能在电力系统的经济性分析

□ 储能在用户侧的经济性分析

◆ 成本分析

与发电侧、电网侧储能一致，用户侧储能的全寿命周期成本包括初始投资成本运行维护成本、置换成本和废弃处置成本，详见书本式(9-16) - (9-22)。

◆ 收益分析

用户侧储能系统的收益包括：“低储高发”收益、减少容量费用收益和提高可靠性收益。

1. “低储高发”收益

配置在用户侧的储能系统，由“低储高发”产生的年运行收益为

$$I_{user1_ann} = \sum_1^{Dcd} \left(\sum_{i=1}^{n1} p(i) Q^+(i) / \eta_{dis} - \sum_{i=1}^{n2} p(i) Q^-(i) \eta_{cha} \right)$$



$Q^+(i)$	第 <i>i</i> 时段储能系统的放电功率	$n1$	一天内的放电时段数
$Q^-(i)$	第 <i>i</i> 时段储能系统的充电功率	$n1$	一天内的充电时段数
η_{dis}	储能系统的放电功率系数	$p(i)$	第 <i>i</i> 时段的电价
η_{cha}	储能系统的充电功率系数		

9.3 储能在电力系统的经济性分析

□ 储能在用户侧的经济性分析

2. 减少容量费用收益

在用户侧配置储能系统，减少容量费用收益为

$$I_{user2_ann} = C_{tr}(S_{tr} - S_{tr_ess}) \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

C_{tr}	专变单位容量造价
S_{tr}	没有储能时的运行容量
S_{tr_ess}	增加储能后的运行容量

3. 可靠性收益

在用户侧配置储能系统，提高可靠性收益为

$$I_{user3_ann} = (O_{user} - O_{user_ess}) E_{user}$$

O_{user}	未安装储能用户的年均故障停电时间
O_{user_ess}	安装储能后用户的年均故障停电时间
E_{user}	单位故障停电时间的经济损失期望

4. 提高电能质量收益

在用户侧配置储能系统可以提高电能质量，其效益可通过储能所能等效代替的**电能质量补偿装置的投入成本**描述，即

$$I_{user4_ann} = \sum_{z=1}^Z C_{com}(z)$$



$C_{com}(z)$

投入储能装置后，减少的第 z 类电能质量补偿装置的年投资成本

9.3 储能在电力系统的经济性分析

例9-10 在某10kV大工业用户建设容量为100kW的储能系统。该用户所在省份的工商业尖峰电价为1.0824元/kWh，低谷电价为0.4164元/kWh。采取恒功率放电模式，即在低谷充电、尖峰放电，充放电时长各为2h。铅炭电池和磷酸铁锂电池的技术性能参数如表8所示，其余与计算相关参数见表9，忽略降损收益。试从净现值和内部收益率的角度，判断10kV大工业用户建设铅炭电池和磷酸铁锂电池能否实现盈利。

表8 电池技术性能参数

技术参数	铅炭电池	磷酸铁锂电池
能量转换效率/%	90	95
DOD/%	70	80
服役年限/a	10	12
循环次数/次	3700~4200	3000~5000
每月自放电率/%	1	1.5
能量成本/（元·kWh ⁻¹ ）	1200	1400
功率成本/（元·kW）	1200	2000

表9 其它相关参数

参数	铅炭电池	磷酸铁锂电池
运维成本占比/%	1	1.2
基准收益率（ i_0 ）/%	8	8
年平均运行天数/d	360	360
S_{tr} /kVA	500	500
S_{tr_ess} /kVA	300	300
P_{es} /kW	100	100
S_{es} /kWh	180	150
C_{tr} /（元·kVA ⁻¹ ）	380	380
O_{user} /h	8.76	8.76
O_{user_ess}/h_1	6.13	4.38
$E_{user}/（元·kWh^{-1}）$	3000	3000
充电时长/h	2	2
每月变压器最大需量电价/（元·kWh ⁻¹ ）	40	40

9.3 储能电力系统的经济性分析

1 成本计算

1) 初始投资成本:

铅炭电池:

$$C_1 = \frac{1200 \times 100 + 1200 \times 180}{10000} \approx 33.6 \text{万元}$$

磷酸铁锂电池:

$$C_1 = \frac{(2000 \times 100 + 1400 \times 150)}{10000} = 41 \text{万元}$$

2) 运行维护成本:

铅炭电池:

$$C_2 = 33.6 \times 0.01 \approx 0.3 \text{万元}$$

磷酸铁锂电池:

$$C_2 = 41 \times 0.012 \approx 0.5 \text{万元}$$

2 收益计算

1) “低储高发”收益:

铅炭电池:

$$I_1 = 360 \times (2 \times 1.0824 \times 100 / 0.9 - 2 \times 0.4164 \times 100 \times 0.9) \approx 6.0 \text{万元}$$

9.3 储能在电力系统的经济性分析

磷酸铁锂电池：

$$I_1 = 360 \times \left(2 \times 1.0824 \times \frac{100}{0.95} - 2 \times 0.4164 \times 100 \times 0.95 \right) \approx 5.4 \text{ 万元}$$

2) 减少容量费用收益：

铅炭电池：

$$I_2 = 380 \times (500 - 300) / 10000 = 7.6 \text{ 万元}$$

磷酸铁锂电池：

$$I_2 = 380 \times (500 - 300) / 10000 = 7.6 \text{ 万元}$$

3) 可靠性收益：

铅炭电池：

$$I_3 = (8.76 - 6.13) \times 3000 / 10000 = 0.8 \text{ 万元}$$

磷酸铁锂电池：

$$I_3 = (8.76 - 4.38) \times 3000 / 10000 = 1.3 \text{ 万元}$$

(3) 净现值计算

铅炭电池：

$$\begin{aligned} NV &= 76 \times (0.08 \times 17.48, 1) \\ &\quad - (36.03 \times 17.48, 1) \\ &\approx 82 \text{ 元} \end{aligned}$$

9.3 储能在电力系统的经济性分析

磷酸铁锂电池：

$$\begin{aligned}
 NPV &= 76(54+13) \times (17.48\%, 1) \\
 &\quad - (4+0.5)(17.48\%, 1) \\
 &\approx 13 \text{ 元}
 \end{aligned}$$

(4) 内部收益率计算

铅炭电池：

$$i_1 = 12\%$$

$$i_2 = 15\%$$

$$\begin{aligned}
 NPV &= 76(60+0.8) \times (17.42\%, 1) \\
 &\quad - (36+0.3)(17.42\%, 1) \\
 &\approx 2.8 \text{ 元}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 NPV &= 76(60+0.8) \times (17.45\%, 1) \\
 &\quad - (36+0.3)(17.45\%, 1) \\
 &\approx -0.4 \text{ 元}
 \end{aligned}$$

可见IRR在12% ~ 15%之间，可得：

$$\begin{aligned}
 IRR &= i_1 + \frac{NPV_1}{NPV_1 + |NPV_2|} (i_2 - i_1) \\
 &= 12\% + \frac{2.8}{2.8+0.4} \times (15\% - 12\%) \approx 14.6\%
 \end{aligned}$$

9.3 储能在电力系统的经济性分析

磷酸铁锂电池:

$$i_1 = 15\%$$

$$i_2 = 18\%$$

$$\begin{aligned} NPV &= 76(54+13) \times 17.418\% \\ &\quad - (4+0.5 \times 17.418\%) \\ &\approx 0.2 \text{ 元} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} NPV &= 76(54+13) \times 17.418\% \\ &\quad - (4+0.5 \times 17.418\%) \\ &\approx 3.7 \text{ 元} \end{aligned}$$

可见IRR在15%~18%之间, 可得:

$$\begin{aligned} IRR &= i_1 + \frac{NPV_1}{NPV_1 + |NPV_2|} (i_2 - i_1) \\ &= 15\% + \frac{0.2}{0.2+3.7} \times (18\% - 15\%) \approx 15.1\% \end{aligned}$$

综上, 在当前的峰谷电价条件下, 投资铅炭电池和磷酸铁锂电池均能实现盈利。前者内部收益率为14.6%, 后者为15.1%。

9.3 储能在电力系统的经济性分析

◆ 用户侧储能的典型应用

用户侧储能不仅是**目前储能应用的最大市场**，也是持续保持高增长的一个领域。下表列举了国内外用户侧储能的典型应用实例。

序号	项目名称	储能配置	储能主要功能
1	深圳坪山新区储能电站	磷酸铁钾电池：20MW/40MWh	峰谷套利、事故备用、促进可再生能源消纳等
2	特斯拉能量墙	标准锂电池：10kWh（备用版本）； 7kWh（日常使用版本）	峰谷套利、需求侧响应、事故备用等
3	无锡新加坡工业园智能配网储能电站	锂电池：20MW/160MWh	降低变压器负载率、缓解设备扩容升级、促进可再生能源消纳等
4	福建玛高爱纪念医院储能项目	锂电池：0.75MW/1.8MWh	应急备用电源、提高电能质量、峰谷套利等
5	协鑫分布式储能项目	锂电池：10MWh （由15万只锂电池串并联组成）	峰谷套利、需求侧响应、改善电能质量等
6	江苏连云港港口储能电站	5MW （超级电容：1MW；锂电池：4MW）	减少用电成本、改善电能质量、应急备用电源等

9.4 储能的梯次利用

□ 储能梯次利用概述

◆ 梯次利用的基本概念

- 储能梯次利用又称为**储能降级使用**，指在某一应用场景无法满足要求时，对其进行**功能重组**并应用于其它对性能参数要求更低的场景的过程。
- 动力电池的可用容量会随使用时间衰减。在可用容量**高于某一阈值**时可以作为电动汽车的**动力电池**使用，但是低于此阈值则不能维持电动汽车的续航要求。
- 考虑到此时动力电池仍具有较高的利用价值，可以应用于**其他储能领域**。直至电池容量降低至**30%**左右时再进行化学拆解。



9.4 储能的梯次利用

□ 储能梯次利用概述

◆ 动力电池梯次利用的作用

➤ 降低电池成本，提高动力电池经济价值

提高了电池的**使用寿命**，使电池得到了更充分的应用，从而降低了电池在全寿命周期内的使用成本。同时，退役的动力电池系统在运营过程中还能创造出巨大的**经济效益**，有利于提高电池的经济价值。

➤ 减少环境污染，提高动力电池环保价值

梯次利用有效提高了电池的**寿命周期**，这减少了诸如储能、低速电动汽车等系统对新电池的消耗。同时也减少了因报废处理该部分电池所造成的环境污染。因此，动力电池的梯次利用具有重要的**环保价值**。

9.4 储能的梯次利用

□ 储能梯次利用概述

◆ 动力电池梯次利用的应用领域

➤ 小规模应用

小规模的动力电池梯次利用领域主要包括**家庭**“移动充电宝”、景区观光车和电动自行车等。

➤ 中小规模应用

中小规模的动力电池梯次利用领域主要包括家庭储能、分布式发电、微电网、移动电源、后备电源、应急电源等，用于**支撑微电网的安全、经济、优质运行**。

➤ 大规模应用

大规模的动力电池梯次利用领域主要包括**大型、超大型的商业储能以及电网级储能市场**。例如，废旧锂电池回收后可建成大型的储能系统，用于大规模光伏发电和新能源发电的出率调节。

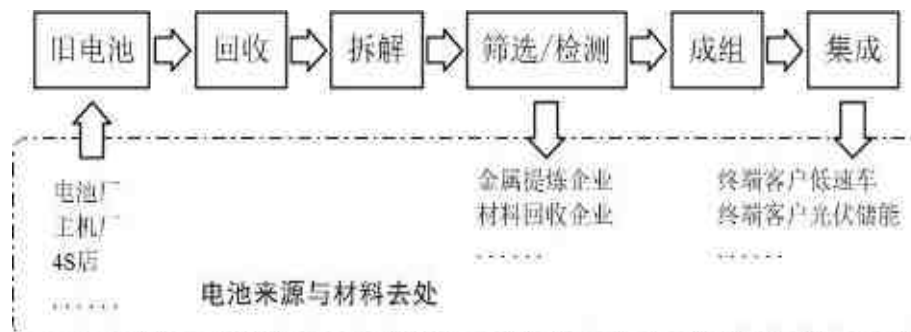
9.4 储能的梯次利用

□ 动力电池梯次利用的基本原理

◆ 动力电池梯次利用流程

主要环节如下：

- (1) **回收**：回收废旧退役动力电池。
- (2) **拆解**：无损拆解回收的退役电池组，以获得单体电池。
- (3) **检测/筛选**：实验检测单体电池的外特性，从中筛选出满足外特性技术指标的可用的单体电池。
- (4) **成组**：对筛选出的单体电池进行配对，重组成为电池组。
- (5) **集成**：系统集成、运维等。



9.4 储能的梯次利用

□ 动力电池梯次利用的基本原理

◆ 退役电池回收模式

➤ 汽车厂商自营回收模式

由**汽车厂商主导**完成退役电池回收，可建立逆向物流回收网络，保证电池的涉密技术不外露。给予厂商及时的反馈，促使其改进产品设计方案。

➤ 生产商联合回收模式

生产商联合指的是**动力电池的生产商组成联盟组织**回收模式。这种方式可为生产商分担风险。然而，一般借助**4S店**和整车企业实现退役电池的回收，这又会在一定程度上提高回收成本。

➤ 第三方回收模式

第三方回收模式是指生产商向第三方交纳一定的费用，将退役电池的**回收责任和风险转嫁给第三方**。其优势在于回收的**专业性与规范性**容易得到保障。然而，其弊端在于**成本投入较大**，且对物流系统的依赖性较强。

9.4 储能的梯次利用

□ 动力电池梯次利用的基本原理

◆ 动力电池梯次利用性能指标

- **电池内阻**：电池串联外电路进行工作过程中，电池内阻会随电池使用时间的增长而增加。当电池的内阻增大到某一标准值后，电池**利用效率迅速下降**，可供电时间大力减少。
- **可用容量**：电池的可用容量反映了电池在一定放电条件下**实际存储电量**的大小。当可用容量降低到**额定容量的80%**时，不能满足电动汽车的正常续航要求；降低到额定容量的**30%**时，需要进行化学拆解。
- **电池电压**：电池电压是电池最重要性能指标之一，具有多种表现形式，包括理论电压、额定电压、开路电压、工作电压等。电池的电压通常会随着**电池剩余电量、环境温度和充放电倍率**的改变而变化。
- **倍率性能**：电池的倍率是指充放电电流大小与电池额定容量的比率，用以表征**电池充放电速度**的快慢。

9.4 储能的梯次利用

□ 动力电池梯次利用的基本原理

◆ 动力电池梯次利用性能指标

- **自放电率**：电池的自放电率常用于衡量电池处于非工作状态时的荷电保持能力，即**电池保持自身能量不变的能力**。影响自放电率的因素主要是电池的制作材料和工艺。
- **放电平台时间**：将电池充满电后，进行一段时间静置，然后对电池以一定放电倍率进行放电，使其**电压下降至所设的截止电压**，记录放电过程时间并将其定义为放电平台时间。
- **充放电效率**：电池的充放电效率即为电池的**电能与化学能之间的转换效率**，常用百分比表示。电池的充放电效率越大，则电池的电能利用效率越高。
- **循环寿命**：电池应用过程中的**每一次充、放电过程**，称为一个充放电循环。电池在寿命周期内所能进行的**充放电循环次数**，可称为循环寿命。循环寿命是电池梯次利用的一个关键性指标。

9.4 储能的梯次利用

□ 动力电池梯次利用的基本原理

◆ 退役电池检测

退役电池的检测可分为**电池性状初检**、**关键电性能全检**及**分组抽样性能测试**3个步骤，具体流程如右图所示。

➤ 电池状态初检

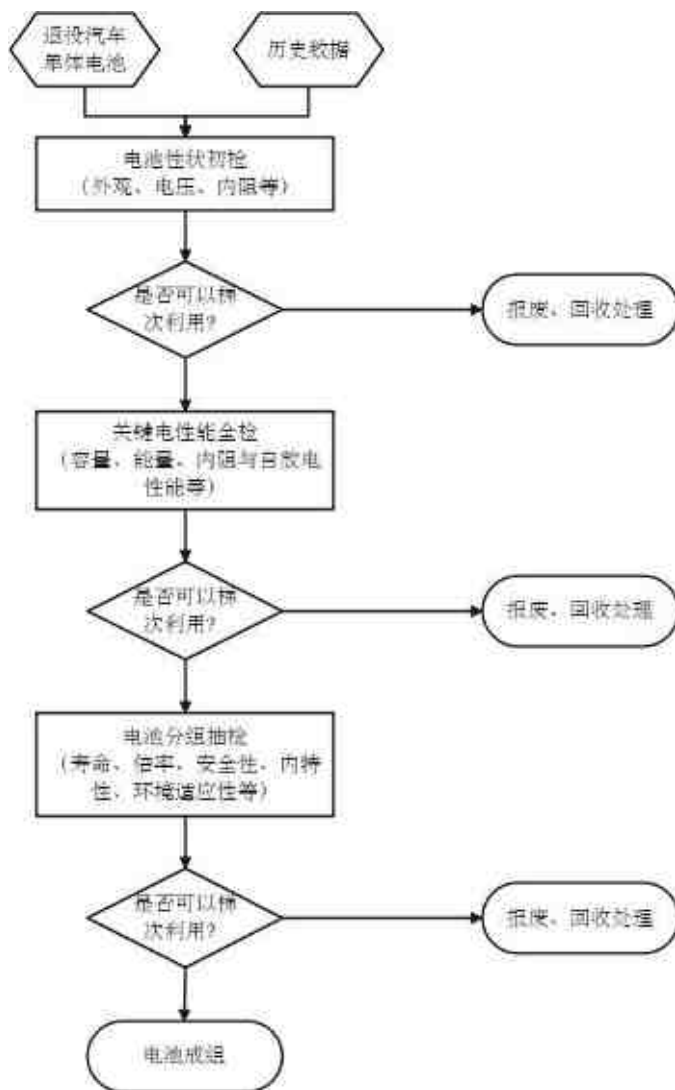
对所有退役电池进行全检，包括电池的外观、电压、内阻等。

➤ 关键电性能全检

检测电池的容量、能量、内阻与自放电性能。

➤ 电池分组抽检

技术手段较为多样，完成分组抽检后，可进一步淘汰不适用的退役电池分组。



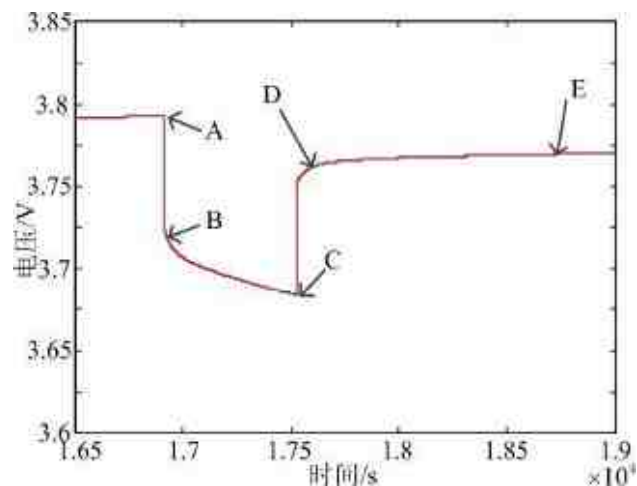
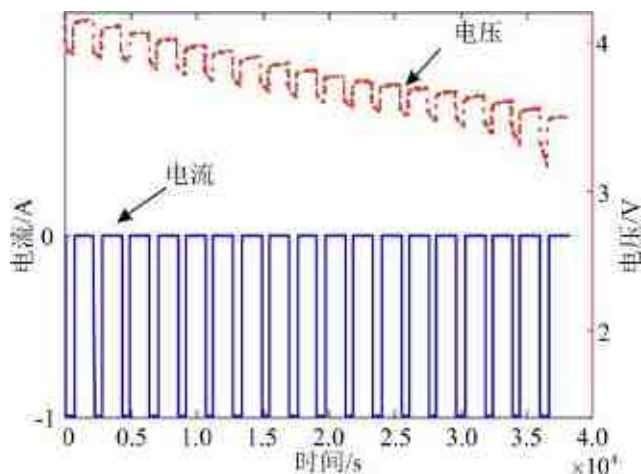
9.4 储能的梯次利用

□ 动力电池梯次利用的基本原理

◆ 退役电池性能指标检测方法

➤ 内阻检测方法

根据电化学原理，电流消失瞬间在电池上所产生的压降全都由电池内阻引起，我们可以据此计算出电池内阻的大小。



利用如下公式计算内阻：

$$R_0 = \frac{U_{AB} + U_{CD}}{2I}$$

9.4 储能的梯次利用

□ 动力电池梯次利用的基本原理

◆ 退役电池性能指标检测方法

➤ 可用放电容量检测方法

退役电池的容量测试一般在温度为**25± 5°C**、大气压力为**86~106k Pa**、湿度为**25~85%**的标准**测试环境**下进行。

以**标准充电方式**对每一个退役电池进行充电。电池充满电后分别以 **1C** 电 流恒流放电至截止电压，记录放电时间，再利用 **电流和时间的积分**得到退役 电池的放电容量，计算公式为

$$Q_{es} = \int_0^t \eta_{dis} I d\tau$$

进一步将所得的放电容量与电池的额定容量相比较，便可判断该电池的 **老化程度**。

9.4 储能的梯次利用

□ 动力电池梯次利用的经济性分析

◆ 梯次利用的成本与收益

动力电池梯次利用的成本构成如右图所示，主要有：购置成本、运输成本、人工成本、测试设备折旧费、电费、电池管理系统(Battery Management System, BMS)成本、电力电子成本和运维成本等。

动力电池梯次利用的场景比较多。如果将其应用于源、网、荷侧，则其在各个场景的收益计算方式与前文类似，此处不再赘述。



9.4 储能的梯次利用

例9-11 已知某动力电池新电池容量为360Ah，额定电压为384V，新电池价格4.5元/Wh；退运后梯次利用时容量为216Ah，SOH为66.7%，充放电效率为90%，充放电深度为60%。在使用电池期间，每经过一次使用，电池容量衰减为原来的99.98%。假设峰时电价1.08元/kWh，谷时电价0.28元/kWh，贴现率定为0.625%。试求：（1）退运电池1~10年在每天一充一放的使用条件下所产生的经济效益。（2）若以所获得的经济效益对退役电池进行定价，试求其单价（单位为元/Wh）。

解：

（1）使用一年，削峰填谷产生的总效益：

1) 充电总成本：

$$C_{c(1)} = 0.216 \times 60\% \times \sum_{i=1}^{365} 0.9998^i \times 0.28 \times 90\% = 11.495 \text{元}$$

2) 放电总收益：

$$C_{c(1)} = 0.216 \times 60\% \times \sum_{i=1}^{365} 0.9998^i \times 0.28 \times 90\% = 11.495 \text{元}$$

9.4 储能的梯次利用

3 第一年总效益:

$$I_{total(1)} = I_{f(1)} - C_{c(1)} = 44.337 - 11.495 = 32.842 \text{元}$$

4 退役电池单价:

$$I_{ess(1)} = 32.842/216 \approx 0.152 \text{元/Wh}$$

(2) 使用二年, 削峰填谷产生的总效益:

1) 未折算前两年的总效益:

$$I_{total(2)} = 0.216 \times 60\% \times \sum_{i=1}^{730} 0.9998^i \times (1.08 - 0.28) \times 90\% = 63.372 \text{元}$$

2) 考虑净现值后, 两年的总效益:

$$I'_{total(2)} = (I_{total(2)} - I_{total(1)}) \times \frac{1}{(1.08)^{\frac{1}{0.04}}} - I_{total(1)}$$

$$= (63.372 - 32.842) \times \frac{1}{(1.08)^{\frac{1}{0.04}}} - 32.842$$

3) 退役电池单价:

$$I_{ess(1)} = 32.842/216 \approx 0.152 \text{元/Wh}$$

9.4 储能的梯次利用

(3) 使用三年，削峰填谷产生的总效益：

1) 未折算前三年的总效益：

$$I_{total(3)} = 0.216 \times 60\% \times \sum_{i=1}^{1095} 0.9998^i \times (1.08 - 0.28) \times 90\% = 91.752 \text{元}$$

2) 考虑净现值后，三年的总效益：

$$I_{npv}' = (I_{total(3)} - I_{total(3)}') \times \frac{1}{(1+0.08)^3} = 91.214 \text{元}$$

3) 退役电池单价：

$$I_{ess(3)} = 91.214/216 \approx 0.422 \text{元/Wh}$$

(4) 使用4~10年，削峰填谷产生的总效益：

1) 未折算前n年的总效益：

$$I_{total(n)} = 0.216 \times 60\% \times \sum_{i=1}^{365n} 0.9998^n \times (1.08 - 0.28) \times 90\%$$

9.4 储能的梯次利用

2) 考虑净现值后，n年的总效益：

$$I_{total(n)}' = (I_{total(n)} - I_{total(n-1)}) \times \frac{1}{(1 + 0.625\%)^{n-1}} + I_{total(k-1)}'$$

代入n即可求得对应的效益及相应的待求量。

结果汇总如下表9-16所示。

表9-16新旧电池单价对比

使用年限/年	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
循环次数/次	365	730	1095	1460	1825	2190	2555	2920	3285	3650
退役电池单价 (元/Wh)	0.152	0.293	0.422	0.542	0.653	0.755	0.850	0.937	1.018	1.046

9.4 储能的梯次利用

◆ 动力电池梯次利用的典型应用

近年来，动力电池梯次利用受到了世界各国的广泛关注。下表列举了国内 外电池梯次利用的典型案例。

国家	应用领域	案例概述	参与主体
中国	电网储能	利用2008北京奥运会退役的电动汽车锂电池，建成了360kWh的储能系统，并在电网中进行应用	国网北京电力公司等
中国	电动自行车	回收电动汽车退役的动力电池，改组后用作48V电动自行车动力电源	国网浙江电力公司
中国	商业储能	自主研发智能电池管理系统，将传统模式发展为“回收-利用-拆解-再利用”，成本低于1元/Wh	格林美股份有限公司
中国	电网储能	利用电动汽车上的退役动力电池建成规模为2MW/7.2MWh的储能系统，通过削峰填谷节省电费，并为电网提供辅助服务	深圳市比克电池有限公司、南方电网综合能源服务公司
日本	家庭、商业储能	日产汽车和住友集团合资建立4R Energy，回收日产汽车的退役动力电池，改组后用于家庭和商业储能	4R Energy 公司
美国	家庭、商业储能	Tesla Energy成功开发了两个产品：由退役电池构成powerwall和powellpack，用于家庭和商业储能领域	Tesla Energy
美国 瑞典	电网储能	美国通用公司和瑞典的ABB集团合作，利用所回收的废旧锂电池，用于新能源发电系统储能	通用公司、ABB 集团

总结与展望

- 储能的成本与其类型及应用场景有关，从**投入时序角度**考虑，主要分为初始投资成本、运营维护成本等；从**运行角度**分析，主要有度电成本、里程成本等；
- 储能在电力系统的各种应用场景的收益可分为两类：储能带来的**新增收益**；因采用储能而**减少的投资或运行成本**；
- 储能的经济性分析指标主要有三种：以时间为计量单位的时间型指标；以货币为计量单位的价值型指标；以相对量表示的效率型指标；
- 储能在电力系统的主要应用模式包括：储能与火电联合运行、储能与可再生能源联合运行、电网侧储能和用户侧储能；

总结与展望

- 动力电池的梯级利用包括主要包括回收、拆解、检测、筛选、成组、集成等环节，其中回收采用汽车厂商自营回收模式、生产商联合回收模式和第三方回收模式；环节通常
- 常见的电池性能指标包括电池内阻、可用容量、电压、循环寿命等，需要根据这些性能指标对退役电池进行检测，为其梯级利用提供依据；
- 在市场、技术、政策等共同驱动下，储能技术逐渐走向成熟，市场需求剧增，成本下降较快，有望在不久的将来获得较高的经济效益，并由此进入可持续的规模化发展快车道。