

机械储能行业ESG白皮书

EVERY TIME YOU TRY IS A LIMITED EDITION

摘要

当绿色浪潮席卷全球，机械储能行业跃然成为可持续发展舞台的关键角色。本白皮书将全景式呈现行业格局与走向，从环境维度、社会范畴、治理领域等各方面，详析战略决策、绿色经营、风险管控与合规运营。以期为行业各方点亮前行灯塔，共筑机械储能ESG新生态，引领绿色未来新征程。



PREFACE

前言

储能行业作为新兴且极具战略意义的领域，正日益成为各方瞩目的焦点。而机械储能行业作为储能行业的关键力量，正处于快速变革与发展的进程中，其在推动能源转型、保障电力稳定供应等方面发挥着日益重要的作用，对其ESG表现的深入探究与总结显得尤为迫切且意义深远。

本白皮书旨在全面、系统地剖析机械储能行业的ESG全貌。第一章对机械储能进行了宏观概览，从储能技术的多元类型到机械储能独特的价值链，深入解读行业规模与发展趋势，进而提炼出其ESG的核心议题，为后续的分析奠定坚实基础。抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能以及重力储能等章节，则分别针对不同类型的机械储能技术，详细阐述其基本情况、价值链构成、关键技术突破以及发展现状，使读者能深入了解各细分领域的特色与发展脉络。

通过本白皮书，我们期望能够为机械储能行业的相关人士提供一份深入洞察机械储能行业ESG内涵与实践的参考资料，共同推动机械储能行业更加绿色、可持续、负责任的高质量发展，为全球能源结构优化与环境保护贡献更大的力量。

ANALYST

研究员

林军婷	CFA ESG证书: 103755823
黄萍	高级注册ESG分析师: 24RZQLKC005119A
张斐	CFA ESG证书: 107203151
石盼盼	高级注册ESG分析师: 24RZQLKC000253A
尚荣刚	高级注册ESG分析师: 24RZQLKC601148A
张瑜	CFA ESG证书: 103823370
郝嘉欣	CFA ESG证书: 102191569 国际通用ESG策略师: SH0327FCA0307 中级注册ESG分析师: RZ202300136234 ISSB FSA 证书: 117641
金亮	CFA ESG证书: 116224242 高级注册ESG分析师: 24RZQLKC601567A
项贇	高级注册ESG分析师: 24RZQLKC005146A
黄海英	高级注册ESG分析师: 24RZQLKC000445A

CONTENTS

目录

第一章 机械储能概览

- 07 储能技术及机械储能
- 09 机械储能的价值链
- 16 机械储能行业的规模
- 18 机械储能行业的发展趋势
- 20 机械储能的ESG核心议题

第二章 抽水蓄能

- 32 抽水储能的基本情况
- 36 抽水蓄能的价值链
- 40 抽水蓄能的发展情况
- 41 南网储能的抽水储能



第三章 压缩空气储能

- 47 压缩空气储能的基本情况
- 50 压缩空气储能的价值链
- 54 压缩空气储能的关键技术
- 56 压缩空气储能的发展情况
- 58 中储国能的压缩空气储能

第四章 飞轮储能

- 63 飞轮储能的基本情况
- 67 飞轮储能的价值链
- 68 飞轮储能的发展情况

第五章 重力储能



第一章 机械储能行业概览

机械储能是利用物理方法将能量储存起来，并在需要时释放的技术。主要包括抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能和重力储能等形式。这些储能方式通过电能和机械能的相互转换，实现能量的存储和释放，以满足电力系统在不同时段的需求，起到调峰填谷、提高能源利用效率、增强电力系统稳定性等作用。

第一节 储能技术及机械储能

由于全球气候问题的影响，碳中和目标正加速推进，加之我国双碳政策的加持，能源转型势在必行，可再生能源电力正在逐渐代替传统能源发电。然而可再生能源电力如风电、光伏发电等，会受到地理位置、天气环境等影响，导致发电不稳定，无法持续供电，供需不平衡等问题，因此需要储能系统来解决。根据储能的工作原理不同，储能系统分为机械储能、电化学储能、电磁储能、化学储能、热储能等。

一、储能技术

各种储能技术中，抽水蓄能属于传统储能技术，其他储能技术都属于新型储能技术。其中抽水蓄能是目前全世界装机容量最大的储能方式。

在全球，已建成的抽水蓄能装机规模约占所有储能方式的 69%，而新增的抽水蓄能装机规模约占所有新增量 12%。

图 1：储能技术的分类



二、机械储能

机械储能是利用物理原理将能量以机械能的形式储存起来，并在需要的时候将其转化为电能或其他形式的能量释放出来的一种储能方式。机械储能主要包括抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能、重力储能。除了抽水蓄能已得到极其广泛的运用，压缩空气储能已在商用领域占据了一定的比例，而飞轮储能尚处于测试阶段，重力储能的运用则更早期。

不同的机械储能方式，从技术表现来看各有特点，下表列出了主要技术指标。

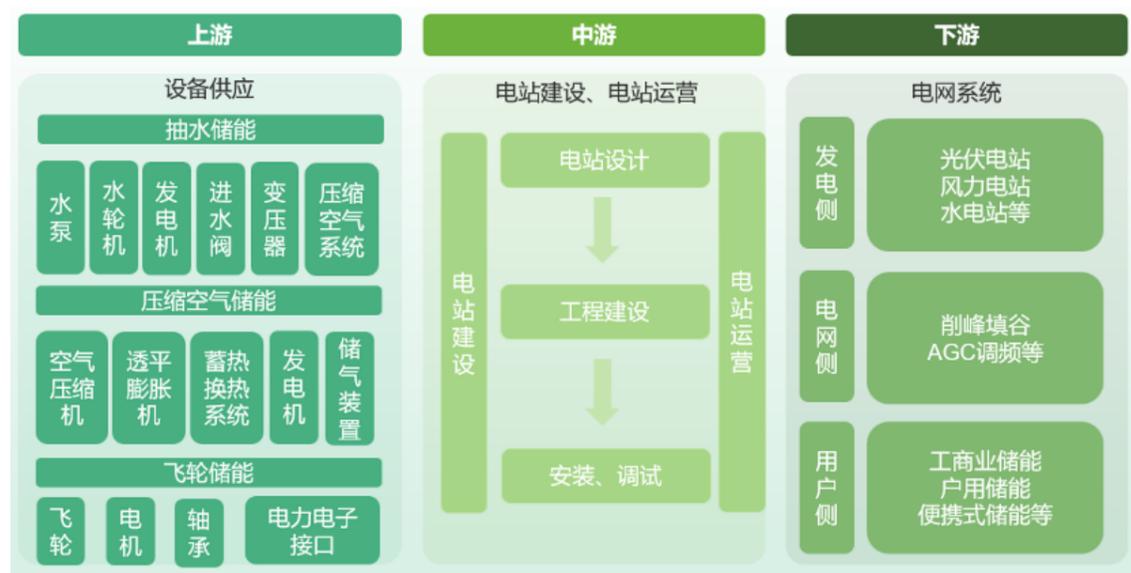
表 1：不同机械储能方式的主要技术对比

类别	抽水蓄能	压缩空气储能	飞轮储能
储能规模	大规模 可达 4-5GW	中等规模 可达 300-400MW	小规模 <22 MW
转换效率	70-85%	65-70%	80-90%
响应时间	秒级 (s-min 级)	分钟级 (min 级)	毫秒级 (ms-min 级)
放电时间	几十小时	20 小时以内	20 分钟以内
使用寿命	40-60 年	30-50 年	15 年以上
技术成熟度	成熟	已商业化	研发测试
应用场景	适用于调峰填谷，紧急备用和黑启动，促进新能源消纳和提升电网调节能力。	适合于电力系统储能，尤其是在需要长时间储能和调峰的场合，可再生能源并网和辅助服务。	适用于电网调频、企业级 UPS 不间断电源、平滑电网波动等需要快速响应的场合。

第二节 机械储能的价值链

机械储能行业的价值链，包括上游的设备供应、中游的电站建设和电站运营，以及下游的电网系统。

图 2：机械储能的价值链



一、价值链拆解

1. 上游：设备供应

机械储能价值链的上游集中于关键设备的制造：

- 抽水蓄能的上游主要包括水泵、水轮机、发电机、进水阀、压缩空气系统等。
- 压缩空气储能的上游包括压缩机、透平膨胀机、储气罐、换热器等。
- 飞轮储能的上游包括飞轮本体、轴承、电机等。

2. 中游：电站建设、电站运营

(1) 项目规划与设计

对于抽水蓄能电站，需要综合考虑地形地貌、水资源条件、电网需求等多方面因素，确定抽水蓄能电站的选址、装机容量、上下水库的规模和布局等。专业的设计团队会进行详细的工程设计，包括水库

的结构设计、水道系统设计、厂房布局设计等，制定出科学合理的建设方案。

对于压缩空气储能电站，选址同样至关重要，需要考虑地质条件、地下空间可用性（如废弃矿井、岩洞等）、与电网的连接条件等因素。

对于飞轮储能电站，与前两者不同，技术方案的设计则是起步的重点，包括飞轮的类型（如高速飞轮、低速飞轮）、容量、转速、储能时间等参数的确定，以及电力电子转换系统、控制系统等的设计。

(2) 电站施工

抽水蓄能电站的施工包括上下水库的建设、大坝的修筑、水道的挖掘和衬砌、厂房的建设等。这是一个复杂且耗时的过程，建设周期一般需要 6-8 年。

压缩空气储能电站的关键是储气设施的建设。如果利用废弃矿井等天然地下空间，需要对其进行改造和加固，确保其密封性和安全性。如果建设人造储气罐，则需要进行罐体的设计、制造和安装。压缩空气储能电站建设周期相对较短，一般为 12-18 个月。

(3) 设备组装与集成

这一环节将零部件组装起来，并将核心储能设备与其他相关设备（如电气设备、控制设备、监测设备等）进行集成，构建完整的机械储能系统。

系统集成是将机械储能技术有效应用于实际场景的关键步骤。它将储能系统与电力系统、发电设备和用电设备进行无缝对接，确保储能系统的稳定运行和高效能量管理。系统集成不仅涉及硬件的组装和配置，还包括软件的优化与协调，确保不同组件能够无缝协作，从而达到预期的性能和可靠性。在机械储能系统中，系统集成的质量直接影响到整个储能装置的效率、稳定性和经济性。

◆ **硬件集成：**将储能设备、控制系统、传感器、电力变换设备（如逆变器）、散热系统等硬件组件组装成一个完整的储能系统。硬件集成要求各组件之间具有高度的兼容性，并且能够在运行过程中保持稳定和高效。

- 抽水蓄能系统：水轮机、发电机、调速系统等零部件；
- 压缩空气储能系统：压缩机、储气罐、燃烧器、燃气轮机等零部件；
- 飞轮储能系统：飞轮、电机、控制系统等零部件。

- ◆ **软件集成**：储能系统的控制和管理需要依赖先进的软件系统，包括能量管理系统（EMS）、监控系统、自动化控制系统等。软件集成的关键在于确保系统的各个部分能够通过软件进行实时通信和协调操作，特别是在复杂的运行环境下，需要确保软件系统能够快速响应并进行自我调节。
- ◆ **数据通信与网络集成**：现代储能系统通常配备了大量的传感器和控制设备，这些设备之间需要通过可靠的通信网络进行数据交换。网络集成包括建立稳定的通信网络，确保数据传输的实时性和准确性，以及设计有效的数据处理和存储策略，以支持系统的决策和控制。
- ◆ **功率管理与电力变换**：功率管理系统通过调节电力的流动，确保储能系统在充放电过程中保持稳定。电力变换设备（如逆变器）将储能系统产生的直流电转换为电网所需的交流电，或反之。功率管理系统需要与电网密切配合，确保储能系统能够根据电网的需求灵活调节输出功率。
- ◆ **安全与保护系统集成**：为了确保储能系统的安全运行，系统集成中必须包含各种保护机制，如过压保护、过流保护、过热保护等。安全系统需要实时监控储能设备的运行状态，及时发现并处理异常情况，防止事故发生。

(4) 安装与调试

设备的安装精度和调试质量对电站的运行性能至关重要。通过调试和测试，发现并解决系统中存在的问题，确保电站能够满足设计要求。

- 空气压缩机需要高效地将空气压缩并储存到储气设施中，膨胀机需要在释能过程中充分利用高压空气的能量驱动发电机发电。
- 飞轮的转速测试、储能和释能测试、电力电子转换系统的测试、控制系统的测试等是验证飞轮储能系统性能和功能的必要环节。

(5) 电站运营

储能和释能的调度管理是电站运营的核心。

- 抽水蓄能电站：根据电网的负荷需求和电能供应情况，储能电站合理安排抽水蓄能电站的抽水和发电过程。在用电低谷期，将下水库的水抽到上水库，储存电能；在用电高峰期，将上水库的水放下来，通过水轮机带动发电机发电，向电网输送电能。

- 压缩空气储能电站：在电价低谷期，启动空气压缩机将空气压缩储存到储气设施中；在电价高峰期或电网需求高峰期，释放高压空气驱动膨胀机发电。
- 飞轮储能电站：在电网负荷低谷期，将电能转化为飞轮的动能储存起来；在电网负荷高峰期，将飞轮的动能转化为电能释放到电网中。

调度人员需要实时监测电网的运行状态，观测电价变化，根据调度指令进行操作，确保电站的运行与电网的需求相匹配，通过优化储能和释能策略，提高电站的经济效益。此外，电站运营还包括设备监控和维护、安全管理、性能评估优化等环节。

3. 下游：电网系统

下游电网系统的应用是将储存的能量转化为实际用途的过程。应用场景可分为发电侧储能、输配电侧储能和用户侧储能三大场景。

发电侧的应用主要涉及传统电站和新能源电站。新能源发电具有间歇性和不稳定性，新能源电站如光伏电站、风电厂配套储能系统可以有效平滑新能源场站的出力波动，减少弃风弃光¹现象，提高新能源的消纳能力，使新能源发电能够更稳定地并入电网。

电网侧的应用主要涉及电网公司。电网的负荷存在峰谷差异，储能系统可以在用电低谷时储存电能，在用电高峰时释放电能，实现削峰填谷，缓解电网的供需矛盾，提高电网的运行效率。同时，储能系统能够快速响应电网的频率变化，参与调频服务，维持电网的频率稳定。

用户侧主要包括工业，商业，家庭和交通储能等应用场景。工商业用户可通过储能进行峰谷价差套利和作为备用电源，应对突发的停电情况，而居民用户可以安装小型储能系统与分布式光伏结合实现自给自足，减少对电网的依赖。在停电时，储能系统可以为家庭提供应急电源，保障基本的生活用电。

二、ESG 理念对价值链的影响

纵观机械储能价值链，中游“电站建设、电站运营”是实现储能技术应用的核心环节，涵盖从前期规划设计到最终系统调试与运行的全过程，每一个环节都决定了项目的成败。项目建设的质量和效率直接影响到储能系统的技术性能、经济效益以及长期运行的稳定性。也因此，中游“电站建设、电站运营”和 ESG 的关系最为密切。

¹ 储能技术可以存储风电和光伏发电产生的过剩电能，减少因电网调节能力不足而产生的弃风弃光现象。

1. 项目规划设计

项目的规划设计是机械储能项目建设的首要步骤，决定了项目的整体布局、技术路线、经济性和环境影响等多个关键因素。

(1) 选址与可行性研究

项目选址是机械储能项目建设的第一步，尤其是抽水蓄能项目，地理条件非常关键，在地质条件复杂或环境敏感的地区，选址合理性直接关系到项目的可行性和安全性，必须全面考虑环境和社会影响。选址要考虑到地形、土地使用、环境影响以及水资源条件，确保项目的可行性和经济性。可行性研究则包括地质勘探、水文分析、环境影响评估以及经济效益分析等，为项目的技术方案提供科学依据。

机械储能项目，特别是大规模建设的项目，可能对当地的生态环境产生一定影响。因此，环境影响评估（EIA）是规划设计中的重要一环，以确保项目不会对当地的生态系统和社区环境造成不可逆的损害。此外，还需考虑社会责任，如避免占用农田或对当地水资源产生负面影响，以维护当地社区的利益。

(2) 技术方案设计

在选址和可行性研究的基础上，技术方案设计包括储能技术的选型、系统布局、设备配置以及配套设施的设计等。该过程需要综合考虑储能系统的效率、稳定性、施工难度以及投资成本，确保设计方案既满足技术要求，又具备良好的经济性。

2. 设备采购与集成

设备采购与集成决定了储能系统的技术水平和长期运行的可靠性。

(1) 设备采购

机械储能系统涉及多种核心设备，如压缩机、涡轮机、飞轮装置、水泵、电力变换器、控制系统等。设备的采购过程需要严格把关，确保采购的设备符合技术规格和质量要求。此外，还需考虑设备的供货周期和成本控制，确保项目的建设进度和投资预算。

设备采购过程中，ESG 标准贯穿整个过程。优先选择具有环保认证的设备供应商，例如国际环境管理体系认证（ISO 14001）、碳足迹认证（如 PAS 2050、ISO 14067）、能源管理体系认证（ISO 50001）、绿色供应链认证（Green Supply Chain Management）等，以降低碳排放和能源消耗。设备生产和运输过程中的碳足迹也应纳入考量，尽量选择低碳、环保的运输方式。

(2) 系统集成

硬件集成：优先使用可持续材料，尽量减少碳足迹。例如，使用低能耗、环保的组件，包括高效逆变器和整流器、高效电动机、节能型变压器等，在电力转换中降低能量损耗，从而降低项目的环境影响，还能够延长系统的使用寿命。

软件集成：考虑能效优化和资源管理，确保系统在运行时尽可能减少能源消耗和碳排放。可以通过集成能源管理系统实时监测并优化设备能耗；在系统内动态分配负载，确保组件运行在最佳效率点上，避免单一组件过载；进行能效监控和数据分析，以找出能耗高的环节，改进软件算法或调整硬件配置进一步优化能效；使用虚拟化和云计算避免高能耗的物理服务器配置，提升资源的动态分配效率，这与 ESG 目标相符，有助于降低项目的长期环境影响。

数据通信与网络集成：随着机械储能系统的数字化程度提高，数据隐私和网络安全问题成为治理的一部分。采用端到端加密保护数据传输，确保敏感信息不被拦截；引入多因素认证和权限管理，严格控制数据访问权限；定期进行漏洞扫描和安全补丁更新，以消除系统安全隐患；部署入侵检测和实时监控系統，快速响应潜在的安全威胁，确保系统数据的安全性，不仅能够保护项目的核心数据不受外部威胁，还能维护客户和社区的信任，这对于项目的长期成功至关重要。

功率管理与电力变换系统：考虑环境友好性，减少电力转换过程中的能量损失和污染。通过引入高效逆变器、模块化电力转换系统和动态功率控制等技术，机械储能系统能够在电力转换过程中减少能量损失，并降低碳排放。这些高效的电力变换方案不仅提升了整体能效，还符合日益严格的环境标准。

在机械储能系统中，功率管理和电力变换系统是关键的技术组成部分。电力变换系统的主要作用是将储存的能量在不同形式（例如机械能和电能）之间进行转换，并将其传输到电网或其他用电设备。然而，在这个转换过程中，如果技术不够高效，就会导致大量能量损失和不必要的电能浪费，增加系统的运营成本，并对环境造成负面影响。

为了解决这一问题，引入高效的电力变换技术至关重要。具体来说，可以通过使用先进的半导体材料、智能控制算法和优化的电路设计，减少电能转换过程中的损耗。这样不仅能显著提升系统的能量转换效率，还能减少因为能量损耗而产生的热量和废气，从而减少对环境的污染。

同时，高效的电力变换技术还能够降低碳排放，因为在整个储能系统中，能量损失减少意味着需要消耗的原始能源量也相应减少。尤其是在可再生能源整合的背景下，优化的电力变换系统可以更好地将太阳能、风能等清洁能源转换为电力，并储存到系统中。

(3) 施工和管理

施工阶段则包括设备的安装、调试以及系统的整合。工程设计和施工的质量直接关系到项目的最终表现，因此需要专业的团队进行管理。施工管理是确保机械储能项目按时、按质、按量完成的关键，涉及工程进度管理、质量控制、安全管理等多个方面。

施工管理中，ESG 因素至关重要。施工团队需要遵守严格的环境保护标准，减少施工噪音、粉尘和废水排放，最大限度地减少对周围社区的扰动。

噪音控制：机械储能项目通常涉及大量的土石方工程和大型设备安装（如飞轮、压缩机等），施工阶段的噪音较大。因此，机械储能项目在噪音控制方面要求更严格，特别是在场地选择和隔音处理上，更加注重在敏感区域（如居民区或自然保护区）使用降噪措施。可选择低噪音设备，并在施工时段优先使用。对于可能产生高噪音的设备（如钻机、锤击机等），尽量安排在白天作业，避免夜间施工扰民。在设备周围设置隔音屏障，减少噪音传播，特别是针对临近居民区或生态保护区的场地。为施工人员配备降噪耳罩，并定期监测噪音水平，确保符合当地环境噪音标准。

粉尘控制：机械储能项目建设往往包括开挖、土地平整等地表施工，导致粉尘量较大，因此需要更多湿法作业和防尘布覆盖。相比之下，液流电池或压缩空气储能系统通常在室内完成设备安装，土建作业较少，粉尘控制需求也相对低。采用湿法作业，施工前对地面喷洒水，以减少扬尘。对于裸露的土壤区域，使用防尘布或绿网覆盖，减少风蚀扬尘。设置临时喷水装置，并在土石方工程期间增加洒水频次，确保粉尘控制在规定范围内。在施工现场出口处设立清洁区，安装车轮清洗设备，避免带泥车辆上路，减少扬尘扩散。

废水处理：机械储能施工过程中会产生大量废水，例如地基开挖的泥浆水、混凝土清洗水等。这些废水需要通过沉淀池进行处理，以去除杂质，避免对地下水和周边环境的污染。而电化学储能项目的施工废水则主要来自设备清洗，排放量少且污染程度低，因此处理要求相对简单。建设废水沉淀池，将施工废水收集并进行沉淀处理，确保泥沙等杂质沉降后再排放或回用。定期检测沉淀池出水水质，特别是 pH 值和悬浮物浓度，确保排水符合当地环保标准，减少对周边水体的影响。对有油污的设备进行集中管理，并配备油污收集装置，防止油污废水流入沉淀池或环境中。

同时，社会责任也是管理中的一个重要方面，必须确保工人有安全的工作环境和合理的劳动条件。安全管理计划中应包含对施工人员的全面保护措施，并防止施工对环境和社区产生不利影响。

(4) 系统调试与验收

系统调试与验收是机械储能项目建设的最后阶段，决定了储能系统能否按预期运行并投产使用。在这个阶段，不仅要确保系统的技术性能，还需要验证其环境影响是否符合预期的 ESG 标准。比如，系统的能效表现和碳排放水平是否达标，操作是否符合环保要求等。调试过程中的环保监测和最终验收中的社会责任考量，都是保障项目符合 ESG 目标的重要环节。

系统调试：在设备安装完成后，系统调试是确保储能系统能够正常运行的关键步骤。调试工作包括单体设备的测试、系统联调和功能测试。通过调试，可以发现并解决系统中的潜在问题，优化系统的运行参数，确保储能系统在不同工况下都能稳定高效运行。

验收与投产：调试完成后，项目将进入验收阶段。验收工作包括对施工质量的全面检查，对系统性能的测试和评估。验收合格后，项目将正式投产，进入运营阶段。项目验收是对整个建设过程的总结，也是对项目质量的最终确认。

运营与维护：机械储能系统的长期稳定运行依赖于科学的运营和维护管理。定期的维护不仅可以延长设备的使用寿命，还可以提高系统的运行效率，减少故障发生率。

第三节 机械储能行业的规模

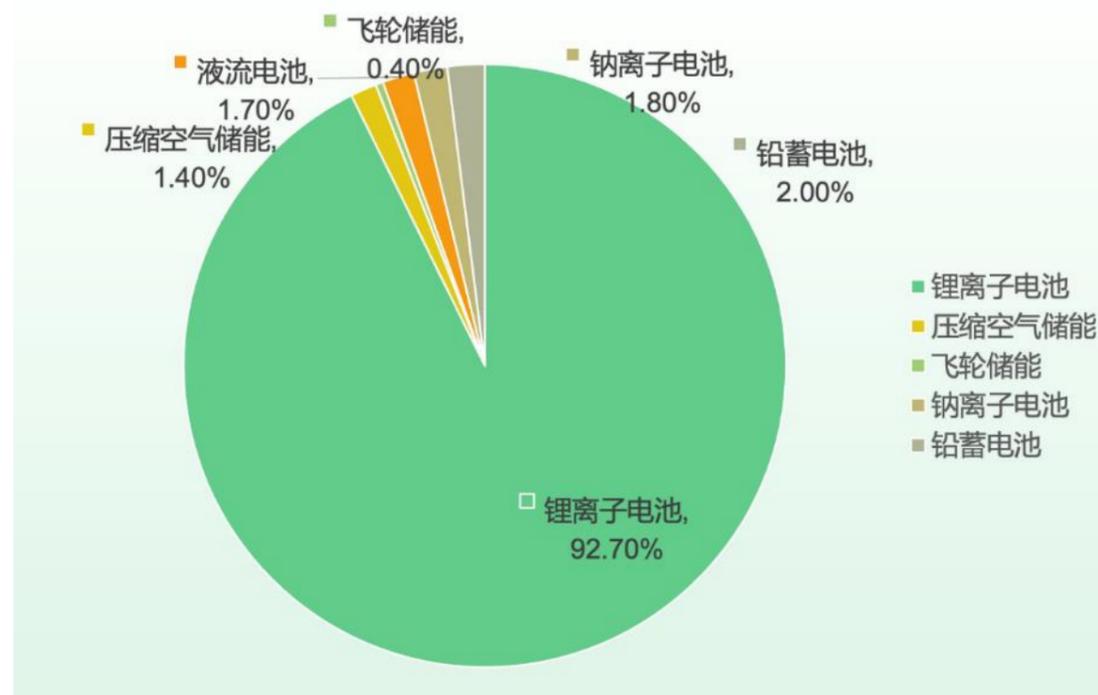
近年来，随着全球对可再生能源的重视和能源转型的推进，机械储能行业的市场规模呈现出增长的趋势。在电力系统中，为了有效解决可再生能源的间歇性和波动性问题，对储能的需求日益增加，推动了机械储能市场的发展。

2023 年全球储能累计装机功率约 289GW，其中抽水蓄能累计装机量 198GW，占比 69%；新型储能，包括电化学储能、压缩空气储能、飞轮储能等，累计装机量 91GW，占比 31%。

2023 年全球储能新增装机量约 52GW，其中新型储能新增装机量约 46GW，占比 88%；抽水蓄能新增装机量约 6GW，占比约 12%。

2023 年全球新型储能的新增装机中，各技术路径占比情况为：锂离子电池占比为 92.7%，铅蓄电池占比为 2.0%，液流电池占比为 1.7%，钠离子电池占比为 1.7%。压缩空气储能占比为 1.4%，飞轮储能占比为 0.4%。

图 3：2023 年全球新型储能的新增装机容量的占比



国内市场，2023 年中国储能累计装机功率约为 86.5GW。抽水蓄能累计装机功率约为 52GW，占储能装机总量的 60%。

2023 年新增装机量 26.6GW。其中新型储能新增装机量约 21.5GW，占比 80%。

新增装机中，锂离子电池占比为 97.5%，飞轮储能占比为 0.7%，铅蓄电池占比为 0.4%，液流电池占比为 0.2%。可见，目前国内国外市场，抽水蓄能依托其成熟的技术拥有可观的市场空间，而压缩空气储能、飞轮储能作为新型储能技术也正稳步发展。

预计到 2025 年，中国储能累计装机功率约为 142GW，其中新型储能累计装机约为 70GW，抽水蓄能累计装机约为 70GW，抽水蓄能和新型储能的累计装机量持平。

预计到 2030 年，中国储能累计装机功率约为 315GW，其中新型储能累计装机约为 170GW，抽水蓄能的累计装机约为 140GW，新型储能的累计装机量将超越抽水蓄能的累计装机量。

第四节 机械储能行业的发展趋势

机械储能行业发展趋势明显，前景广阔。

1. 技术创新持续推进

- 抽水蓄能方面，不断优化水轮机设计以提升效率，改进水泵性能等；
- 压缩空气储能，研究采用如多级离心压缩机等先进的压缩机技术，提高压缩效率，优化膨胀机叶片设计和流道形状以提高能量回收效率，积极探索新型储气技术，探究新型的储能介质，提高系统储能效率；
- 飞轮储能则致力于研发高性能材料，改进磁悬浮技术来增加储能容量和充放电次数。

2. 规模呈扩大态势

进入 21 世纪，随着材料科学、电子技术、控制技术等的不断进步，机械储能技术得到了进一步的提升。例如，新型材料的应用提高了飞轮储能的储能密度和效率；先进的控制技术使得抽水蓄能电站和压缩空气储能电站的运行更加稳定和高效。

机械储能在电力系统、分布式能源、轨道交通、工业生产等领域的应用不断扩大。在电力系统中，机械储能可以用于调峰、调频、备用电源等；在分布式能源系统中，机械储能可以与太阳能、风能等可再生能源结合，提高能源的利用效率和稳定性。

随着储能市场的拓展，机械储能项目的规模也日益增长。大型抽水蓄能电站持续建设，压缩空气储能和飞轮储能也朝着大容量、高功率方向迈进，以满足大规模储能需求。

3. 机械储能与其他储能技术融合

机械储能与电化学储能在储能特性上具有互补性，电化学储能响应速度快，能够在短时间内实现高功率的充放电，但其能量密度相对有限，且循环寿命会受到充放电深度、温度等因素的影响。

机械储能中，抽水蓄能和压缩空气储能能量存储容量大，适合大规模、长时间的能量存储，但响应速度相对较慢；飞轮储能功率密度高、响应速度极快，但能量存储时间较短。将它们相结合，形成混合储能系统，可以充分发挥各自优势，提升储能系统整体性能与灵活性，适应不同应用场景需求。如可以通过直流母线将机械储能系统和电化学储能系统连接在一起。

例如在一个风力发电场中，当风速突然变化导致发电功率波动时，电化学储能（如锂离子电池）可以在瞬间响应，平衡功率波动。而在长时间的低风速或无风时段，抽水蓄能或压缩空气储能系统可以在较长时间内存储或释放能量，维持电网的功率稳定。

4. 机械储能成本逐渐下降

随着产业链不断成熟，通过技术进步、规模效应及产业链优化，机械储能成本逐渐下降，有助于提高其在市场中的竞争力，促进更广泛应用。加之各国政府为实现能源转型目标和应对气候变化，持续出台支持机械储能发展的政策，为行业发展营造良好政策环境和市场机遇。

5. 国外机械储能的发展较早、较成熟，国内机械储能的发展正在追赶

国内外机械储能的发展差异主要是：

— 研究方面：

国外机械行业在工业革命时期就取得了重大突破，推动了工业化进程。而国内机械行业在建国初期主要通过引进和仿制国外技术，逐步建立了自己的机械制造业体系。

国外机械行业在科技进步时期不断创新，推动了机械设备的智能化和数字化发展。而国内机械行业在近年来也开始加大自主创新力度，但与国际先进水平相比仍存在一定差距。

— 实践方面：

国外机械设备在各个领域得到广泛应用，推动了工业化进程的加速。而国内机械设备在基础建设时期发挥了重要作用，但在高端领域的应用相对较少。

国外机械行业在智能化和数字化方面取得了显著进展，推动了机械设备的智能化发展。而国内机械行业在转型升级过程中也开始注重智能化和绿色化发展，但整体进展相对较慢。

国内外机械行业的发展历程在研究和实践方面存在显著差异。国内技术的发展进程虽落后于国外，但差距已经越来越小，甚至有所超越。

第五节 机械储能的 ESG 核心议题

在全球能源转型的大背景下，储能系统与太阳能、风能等新能源发电项目的结合，在提高新能源的发电效率和电网接入的稳定性方面起到举足轻重的作用。因此作为构建新型电力系统的重要支撑，实现可持续能源价值最大化的关键纽带，储能行业如何持续创新、提高自身可持续发展能力至关重要。

机械储能作为一种重要的能源存储技术，在 ESG 的框架下，ESG 的议题如下。

环境 (E)

1. 能源消耗与碳排放：机械储能系统在运行过程中的能源消耗情况，以及由此产生的碳排放量，是环境维度的重要议题，如何提高机械储能系统的能效，减少不必要的能源消耗和碳排放。
2. 资源利用与循环：机械储能（如抽水蓄能）所依赖的自然资源（如水）的可持续利用情况，储能系统退役后的设备回收与再利用，以及废弃物处理，都是资源循环利用的重要方面。

社会 (S)

1. 劳动安全与健康：机械储能设施的建设和运营过程中，员工的劳动安全与健康问题至关重要，需要建立完善的劳动保护制度，提供必要的安全培训，确保员工在作业过程中的安全与健康。
2. 社区影响与参与：机械储能设施的建设和运营可能对周边社区产生影响，如噪音、景观变化等，需要积极与社区沟通，了解他们的需求和关切，确保项目得到社区的认可和支持。
3. 产品安全与责任：机械储能产品的安全性和可靠性，以及企业对其产品的责任担当，需要建立严格的产品质量控制体系，确保产品的安全性和可靠性，同时积极履行产品责任。

治理 (G)

1. 合规与风险管理：机械储能项目在建设和运营过程中需要遵守相关法律法规和行业标准，需要建立完善的合规管理体系，确保项目的合法合规性，并有效管理相关风险。
2. 公司治理与责任：企业的公司治理结构、决策机制和监督机制，以及企业对社会和环境的责任感。需要建立健全的公司治理结构，明确决策机制和监督机制，同时积极履行社会责任，推动可持续发展。
3. 供应链管理：机械储能项目的供应链管理，包括供应商的选择、评估和管理。需要建立严格的供应商管理体系，确保供应链的稳定性和可持续性，同时积极推广绿色供应链理念。

我们以可持续发展视角，针对抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能行业共性，总结出**三大核心议题**。

一、生态保护和资源利用效率提升

机械储能电站在建设和运营环节，应充分考虑项目对生态环境的影响，进行合理的规划和设计。大型机械储能项目，如抽水蓄能电站，通常需要占用大量的土地资源，并且可能会对周边的生态环境产生一定的影响，如水库建设可能导致的水土流失、生物栖息地破坏等。在项目规划和建设过程中，需要充分考虑土地资源的合理利用，尽量减少对生态环境的破坏，采取生态修复措施，保护生物多样性。

例如，抽水蓄能电站的建设对地质地形等自然条件要求较高，在站点选择和规划时，需充分考虑生态环境的保护，尽量减少对周边生态系统的破坏。同时，要合理评估水资源的利用和调配，确保与当地的水资源承载能力相适应。针对储能电站建设和运营过程中产生的各种污染物，如废水、废气、固体废弃物等，需要进行有效的处理和控制在，确保符合环境排放标准。

案例实践：广州抽水蓄能电站

广州抽水蓄能电站是中国自行设计和施工的第一座高水头、大容量抽水蓄能电站，也是全球已投运的最大抽水蓄能电站之一。广蓄电站在建设期间，就注重最大限度减少对生态的破坏，采取边建设边恢复的措施。

在项目选址阶段，充分考虑周边生态环境的敏感性，避开生态脆弱区和重要的生物栖息地，从源头上降低对生态环境的潜在威胁。在电站的设计阶段，对厂房、输水管道等设施的布局和设计加以优化，减少山体开挖和填方量，从而降低对山体稳定性和周边植被的破坏。

在工程建设期间，为防止水土流失和山体滑坡的情况发生，采用喷锚支护、格构梁支护等方式增加边坡的稳定性，同时在边坡上种植植被，既起到固土护坡的作用，又能恢复生态环境。为降低水土流失的风险，建设截水沟、排水沟等排水设施，以便将雨水及时引排到合适的地点，防止雨水在工程区域内积聚和冲刷。对于工程建设过程中产生的弃渣，合理规划弃渣场的位置，并采取工程和植物措施进行防护。在弃渣场周围设置挡渣墙、护坡等工程设施，防止弃渣流失；在弃渣场表面覆盖土壤，种植植被，以恢复生态环境。

电站建成后，周边依然保存着完整的生态林，加上电站上、下两座水库，形成了绿水青山相映成趣的美丽景点，成为当地的一张亮丽名片。截至目前，广蓄电站已累计种树 70 万棵，植草 15 万平方米。每年 9 月，白鹭便会如约来到广蓄电站休养生息，呈现出一幅人与自然和谐共生的美丽画卷。

图 4：白鹭来到广蓄电站休养生息（每年 9 月）



来源：新华网

案例实践：深圳抽水蓄能电站

深圳抽水蓄能电站是一座拥有山海公园美景的抽水蓄能电站，也是我国首座建设在超大城市市区内的抽水蓄能电站。从规划、设计、建设到运营全过程，深圳抽水蓄能电站将环保理念融入各个环节，实现同步设计、同步实施、同步投入使用。

在规划设计中，减少山体边坡开挖的情况。深圳抽水蓄能电站上、下水库连接公路的 K8 至 K9 路段，其原设计线路是沿着山体外侧临边进行布置的，需通过边坡开挖来形成路基，此路段长度达 720 米。为减少工程施工对生态环境产生的扰动，相关部门组织开展了设计优化工作。通过设置隧洞（K8+880~K9+180），将局部公路截弯取直，使得该段线路长度缩短至 300 米，这样既保护了森林植被，又消除了因高边坡开挖而带来的安全隐患。

项目组针对水土流失的防治问题，综合考虑地形地貌、雨水汇流特点、施工布置、施工扰动情况以及水土流失强度等多种因素，把项目范围划分为 6 个水土流失防治区，并采用 3 类防治措施。其中，第 1 类措施用于整体地表扰动较轻且植被覆盖茂密的区域，在此区域将水流汇集到三洲塘、铜锣径等原有的水塘后再排放；第 2 类措施针对地表植被稀少、扰动范围较大且水土流失强度大的区域，通过修筑拦水埂形成一级沉砂池，进而修建二级过滤堰坝，让水流经沉沙和过滤后排出；第 3 类措施是为防

止雨水对裸露的土质边坡造成冲刷，在坡面植草覆绿之前实施全覆盖。通过这 3 类防治措施的综合运用，达到减少水土流失的目的。

电站投产后实施生态景观提升工程，上水库区域作为深圳盐田区“半山翡翠”公园带组成部分，对市民免费开放，成为深圳市民徒步休闲的热门景点。

为保障市民用上干净、清洁的水，深蓄电站地下厂房排水系统创新采用“清污分离”设计，设置了清水、污水两套独立的排放系统，分别把水引入不同的集水井。岩石渗漏清水直接抽排入下库，不浪费水资源；生产污水经一体化污水处理系统后接入市政排污管网。深蓄电站上水库、下水库水质长期稳定在二类饮用水标准，2021 年供水超过 630 万立方米，实现水资源利用和生态环境效益最大化。

压缩空气储能项目有部分采用地下储气库的形式，需要评估对地下空间资源的合理开发与保护，避免过度开采或造成地质结构破坏。在利用废弃矿井或盐穴这些地下资源时，需要评估对地质结构的影响，确保储气设施的安全环保。

案例实践：江苏宜兴抽水蓄能电站

江苏宜兴抽水蓄能电站是中国电力行业近年来新建的机械储能项目之一，总装机容量为 1500MW，项目的建设对于江苏省电网的稳定运行和新能源的消纳具有重要作用。该项目的规划、设计、施工和验收管理都代表了当今机械储能项目的最新实践。

在规划阶段，宜兴抽水蓄能电站充分考虑了区域内的电网需求和自然条件。项目选择了地势较为陡峭的山区，以便于建设上、下水库，最大化利用地形落差提高发电效率。为了适应日益增长的新能源接入需求，项目设计了一套高效的水轮发电系统，可以快速调节电力输出。此外，规划还特别关注对环境的影响，提出了保护当地生态系统的措施，包括对植被的保护和水资源的可持续管理。

在设备采购方面，宜兴抽水蓄能电站优先选择了国内外领先的水泵水轮机制造商，以确保设备的高效和可靠性。该项目的核心设备——可逆式水泵水轮发电机组由国内知名厂商东方电气制造，这些机组具有能效高、响应快的特点，能够在短时间内切换抽水和发电模式。此外，控制系统、变压器和输电设备的采购都采用了最先进的技术标准，以确保项目在运行过程中具备高效稳定的电力调节能力。

施工管理是项目的关键环节，宜兴抽水蓄能电站采用了严格的施工进度控制和质量管理措施。由于地形复杂，施工难度较大，项目方制定了详细的施工计划，合理安排了土方工程、水库建设和机电设备的安装顺序。在项目施工期间，采用了先进的工程管理软件，实时监控施工进度，确保项目按期推进。

为减少施工对周边居民和环境的影响，建设方还特别安排了环保专员，监督施工期间的噪音、粉尘排放等环境问题。

在项目建设完成后，系统调试与验收是确保项目顺利投运的最后环节。宜兴抽水蓄能电站在设备安装完毕后，进行了全面的系统调试，确保水泵水轮机组、变电站和输电线路的各项指标达到设计要求。调试阶段历时数月，进行了大量的负荷测试和系统响应测试，验证了设备的稳定性和电力调节能力。在多方专家的参与下，项目最终通过了验收，并于 2023 年下半年顺利投运。

宜兴抽水蓄能电站的建设为江苏电网提供了强有力的支持，其成功运行标志着中国机械储能技术的进一步成熟，也为未来更多的储能项目建设提供了宝贵的经验。

案例实践：大同云冈矿北大巷废弃巷道压缩空气储能电站

全球首个煤矿废弃巷道压缩空气储能电站项目——大同云冈矿北大巷废弃巷道压缩空气储能电站项目，利用了清华大学科研团队研发的零排放压缩空气储能技术。基于废弃煤矿巷道作为储气库而搭建，项目总规模达 100 兆瓦。项目建设期间，项目组对废弃煤矿巷道进行详细的地质勘察和结构评估，挑选出地质条件稳定、巷道空间形态适宜、密封性较好的巷道区域，进行加固和改造，确保其能够满足储存高压空气的要求。大同云冈矿的项目中，巷道总长度 9000 余米，可用总长度约 7000 余米，可用容积达 9 万余立方米。

云冈矿毗邻世界文化遗产云冈石窟，是一座有着 50 多年开采历史的老矿，累计产煤超过 1.4 亿吨，如今资源临近枯竭，面临转型压力。鉴于其长期的煤炭生产形成了丰富且体量巨大的地下水平巷道和竖井，利用废弃矿井巷道建设压缩空气储能电站不仅有效促进新能源的消纳利用，也为资源枯竭矿井创出一条资产效益最大化的可持续发展之路。

案例实践：金坛盐穴压缩空气储能国家试验示范项目

金坛盐穴压缩空气储能国家试验示范项目建设在常州金坛地区，是我国首个压缩空气储能国家示范项目。常州金坛地区拥有丰富的盐矿资源，以往盐矿开采后，留下了形态大小各异的空盐穴，如果不用来储能就要进行封堵，以防发生地面塌陷等事故。将废弃盐穴用于压缩空气储能，不仅避免了盐穴资源的闲置和可能带来的安全隐患，还实现了废弃资源的再利用。

同时，该项目采用“非补燃”技术，在用电低谷时将空气压缩到盐穴中，用电高峰时再释放压缩空气发电，整个过程不烧煤、不烧天然气，没有额外的燃料补燃，从而实现了零碳排放的工艺路线。这对于减少温室气体排放、应对气候变化具有重要意义，有助于推动我国实现“碳达峰、碳中和”的目标。

案例实践：北京地铁房山线广阳城站地铁飞轮储能项目

2019 年 7 月，盾石磁能科技的 1MW GTR 飞轮储能系统在此成功商用，此为国内城市地铁首例，突出了节能减排与高效利用优势。例如，原材料与生产环节采用特定材料与技术，实现高密度储能目标，且部件可回收、设备模块化。在节能减排方面，有效存储列车刹车电能，减少能源浪费与热排放，提升电能使用效率并降低对电网冲击。该项目的效果显著，平均每小时回收节约电量可观，减少电能消耗与二氧化碳排放，节能与稳压效果好，平均节能率及全功率响应频次也高效可靠。

反面案例：Dinorwig Power Station

Dinorwig 抽水蓄能电站位于英国威尔士，虽然该项目以快速响应电网需求而闻名，但在碳减排方面存在明显问题。由于建设时期使用了大量的混凝土和钢材，加上其日常运营过程中对化石燃料的依赖，Dinorwig 的碳足迹远超预期。此外，早期该项目为了提高电站效能，使用了大量的柴油发电设备进行辅助运行，短期内的碳排放大幅上升，引发了公众对其长期碳减排能力的质疑。虽然电站最终减少了化石能源的使用，但初期的碳排放远高于标准，对该项目的绿色形象产生了负面影响。

二、关注社区友好和社区接受度提升

大型抽水蓄能项目的建设往往涉及到移民安置问题，水库淹没区的居民需要被重新安置，这对他们的生活产生巨大的影响，妥善的移民安置方案不仅要解决居民的住房问题，还要考虑他们的就业、教育、医疗等基本生活保障，确保移民能够融入新的社区并维持原有的生活水平。

案例实践：广东阳江抽水蓄能电站

广东阳江抽水蓄能电站工程位于广东省阳春市与电白县交界处的八甲山区，项目施工区域和水库淹没区占地面积 4.73 平方千米，涉及移民安置人口 1145 人。政府制定了详细的移民安置方案，包括移民的范围、安置地点、补偿标准等。规划建设移民安置区总占地面积 115 亩，建设移民房屋 249 幢，配套建设有公共管理楼、垃圾中转站、文体活动场所、停车场等设施。政府与移民签订房屋征收安置补偿协议，明确补偿标准和方式。为解决移民的生产生活问题，政府按每亩耕地每年 4000 多元的标准，向移民提供生产安置补助。此外，还积极引导移民发展特色产业，增加收入来源。开展就业培训，帮助移民提高就业技能，实现再就业。

案例实践：山西省长治市屯留区鼎轮能源飞轮储能项目

对于飞轮储能电站，在其建设过程中，应充分考虑社区居民的生活需求和感受。首先，在选址阶段，要远离居民区、学校、医院等敏感区域，避免对居民的日常生活造成干扰。同时，进行科学的环境评估，确保不会对周边生态环境产生不良影响。施工期间，严格控制噪声和粉尘污染，采用先进的降噪技术和设备，合理安排施工时间，避免在居民休息时间进行高噪声作业。此外，要加强与社区的沟通和交流，及时向居民通报施工进度和采取的环保措施，听取居民的意见和建议，积极回应居民的关切。

在运营阶段，要确保飞轮储能电站的安全稳定运行。建立完善的安全管理体系，加强设备的维护和监测，防止发生安全事故。同时，持续关注噪声和电磁辐射等问题，采取有效的防护措施，确保其对社区的影响控制在最低限度。总之，飞轮储能电站在建设和运营过程中，只有充分考虑社区的利益和需求，积极采取措施保持社区友好，才能实现可持续发展。

位于山西省长治市屯留区鼎轮能源飞轮储能项目，是中国首座电网级飞轮储能调频电站，在项目建设前，项目组对选址进行严格的评估和考量，选址在长治市屯留区康庄工业园区康庄路与康庄北一路交叉口西北角地块中的 A-04 地块。该地块位于屯留区东部平川地区，地质结构稳定，且远离居民聚居的城镇中心区域。这样可以最大程度地减少因地质灾害等潜在风险对周边居民造成的威胁。该项目由鼎轮能源科技（山西）有限公司和华北电力大学先进飞轮储能技术研究中心合作建设，采用先进的飞轮储能技术和高质量的设备，确保系统运行的稳定性和可靠性。

同时，项目采取有效的隔音和降噪措施，降低项目运行过程中产生的噪音。例如，使用隔音材料对设备进行包裹，优化设备的运行方式，减少噪音的产生和传播，确保周边居民的生活环境不受干扰。

在与社区沟通方面，项目组积极与周边社区居民进行沟通和交流，及时公开项目的相关信息，包括建设进度、安全措施、环境影响等。通过召开座谈会、发放宣传资料等方式，解答居民的疑问，听取居民的意见和建议，增强居民对项目的了解和信任。在项目建设过程中，项目组持续给与社区回款和支持，优先招聘当地居民，为他们提供就业机会，参与社区的公益活动，改善社区的基础设施和公共服务，提升居民的生活质量。

案例实践：江苏中天储能科技有限公司

江苏中天储能科技有限公司在其飞轮储能项目中充分考虑了社区的安全性和利益，特别是在江苏省无锡市的储能电站建设过程中。中天科技与当地政府和社区建立了密切的沟通机制，确保项目的透明性。在项目建设前期，公司邀请了当地居民和环保专家参与环境影响评估会议，并根据反馈调整了施工计划，减少了施工噪音和对周边社区的影响。此外，公司还定期举办社区安全演练，提升社区居民对储能项目的认知度和安全防范意识。这种积极的社区合作和安全措施使项目得到了当地的广泛支持，成为储能行业内社区合作的典范。

案例实践：中国鼎轮飞轮储能电站

山西长治鼎轮能源科技的 30 兆瓦飞轮储能项目，乃是中国首座电网级飞轮储能调频电站，且位列全球最大飞轮储能电站之一，其储能可满足约 2000 户家庭一年用电。

在原材料与生产环节，采用高性能磁悬浮轴承及高强度碳纤维、玻璃纤维材料，于真空、低摩擦环境高效运行，储能效率与系统稳定性得以提升且无污染物产生。

应用方面，通过实时调控有功出力参与电网调频，有效解决区域电网有功不平衡问题，保障电网安全稳定运行，助力“双碳”目标达成，推动飞轮储能技术迈向规模化商业示范应用新阶段。

可持续发展上，该技术具有快速连续充放电、功率精准调节等优势，全生命周期无污染，在可再生能源集成中作用关键，利于平衡电力供应与电网稳定。其应用效果显著，安装 120 台 250 千瓦飞轮储能装置，总功率约 30 兆瓦，采用高速磁悬浮飞轮技术，每天提供 8000 兆瓦至 9000 兆瓦调频里程，一年可为山西电力系统提供 300 万兆瓦调频里程，在电网调频方面贡献卓越。

反面案例：国电的河南南阳抽水蓄能项目

由国家电网新源控股有限公司负责建设和运营的河南南阳抽水蓄能电站在施工过程中忽视了与当地社区的有效沟通，导致社区对项目的不满逐步升级。项目在建设初期因施工噪音问题扰乱了周边居民的生活，居民多次投诉无果后，甚至集体抗议，要求停工整改。此外，项目在运营初期发生了设备故障，虽然未造成人员伤亡，但故障导致了附近区域的大规模停电，加剧了社区的反感。由于安全隐患和社区的不满情绪，该项目最终不得不暂停运营进行整改，并面临着巨额赔偿和重新评估的压力。

三、可持续供应商

机械储能行业产业链较长，从原材料获取到储能系统集成和运营，整个生命周期中的每个环节都可能产生显著的碳排放，可持续供应商占比反映出企业对于供应链排放管理的重视。

随着我国储能行业的快速发展，企业不仅需要在国内市场中保持竞争力，还必须考虑国际市场的要求。特别是对于计划进入欧盟市场的企业而言，欧盟的《企业可持续发展尽职调查指令》(CSDDD) 已成为不可忽视的重要法规。这些法规对供应链的可持续性、材料来源的可追溯性以及供应链的透明度提出了更高的要求。

案例实践：德国西门子的机械储能系统

在一些对电能响应速度要求较高的应用场景，如电网调频、应急电源等，机械储能系统的响应速度至关重要。需要研发更先进的控制系统和机械结构，减少储能系统的响应时间，使其能够快速地完成充放电，以满足电力系统的实时需求。

德国西门子公司为电网提供了先进的机械储能系统，用于调频服务。该系统采用了快速响应的控制系统和高性能的机械部件，能够在毫秒级的时间内对电网频率变化做出响应，实现快速充放电。其先进的电力电子转换器和智能控制算法，确保了储能系统与电网之间的高效能量交互，满足了电力系统对实时频率调整的严格要求。

案例实践：美国 Amber Kinetics 公司的飞轮储能系统

在机械储能的能量转换过程中，不可避免地会存在能量损耗。例如，抽水蓄能在水的抽放过程中，水泵和水轮机的机械能转换、输水管道的水力损失等都会降低系统的整体效率；压缩空气储能的空气压缩和膨胀过程也会有能量损失。因此，研究如何降低这些能量损耗，提高机械储能的能量转换效率，对于其可持续发展具有重要意义。

美国的 Amber Kinetics 公司的飞轮储能系统，采用了先进的磁悬浮技术和高效的电机控制器，减少了能量在转换过程中的损耗。磁悬浮技术降低了飞轮旋转时的机械摩擦损失，高效的电机控制器则提高了电能与机械能之间的转换效率，使得飞轮储能系统在充放电过程中的能量损失大幅降低，提高了整体能量转换效率。

案例实践：美国的通用电气公司（GE）的机械储能系统

机械储能系统的建设和运行需要大量的材料，如钢材、混凝土、永磁材料等。在储能系统的生命周期结束后，如何对这些材料进行有效的回收和再利用，减少资源浪费和环境污染，是一个重要的议题。需要建立完善材料回收体系，研发相关的回收技术和工艺，提高材料的回收利用率。

美国的通用电气公司（GE）在机械储能系统的生产中，建立了完善的材料回收体系。对于废旧的钢材、永磁材料等，采用先进的回收技术和工艺进行回收和再利用。例如，通过专门的磁体回收生产线，将废旧永磁材料中的稀土元素进行提取和再加工，用于生产新的磁体。对于钢材等金属材料，采用回炉熔炼等方式进行再生利用，减少了资源浪费和环境污染，提高了材料的回收利用率。

四、研发及创新

技术创新是确保机械储能项目持续优化的重要议题。储能企业必须不断通过创新提升能源效率、降低成本，使技术更具可持续性。不能积极投资研发的企业可能会在快速发展的市场中处于劣势。

案例实践：比亚迪的飞轮储能技术

比亚迪在机械储能领域持续进行研发创新，特别是在飞轮储能技术上取得了显著进展。比亚迪通过开发新型材料和优化系统设计，提高了飞轮储能设备的能量密度和转换效率，使得储能系统的使用寿命和安全性大幅提升。这种技术的突破不仅提升了其储能设备在国内外市场的竞争力，还得到了多个新能源项目的采用。比亚迪在 2023 年的 ESG 报告中披露，得益于技术创新，储能系统在多个项目中成功应用，降低了整体项目的建设成本和碳足迹，为企业创造了新的利润增长点。

案例实践：PLEIADES 飞轮储能系统

PLEIADES 由法国空间研究中心与格雷希亚公司共同开发，采用四个飞轮储能。其飞轮应用效果显著，改进散热技术使飞轮转速与时长提升，系统整体性能得以优化。完成飞轮、电机、磁轴承及单机集成控制试验，实现单机输出功率首次突破 1MW，为我国单体飞轮最大并网功率。同时提出谐振谐波电流控制方法并在 10kva 试验台验证，有效解决定子谐波对系统影响。

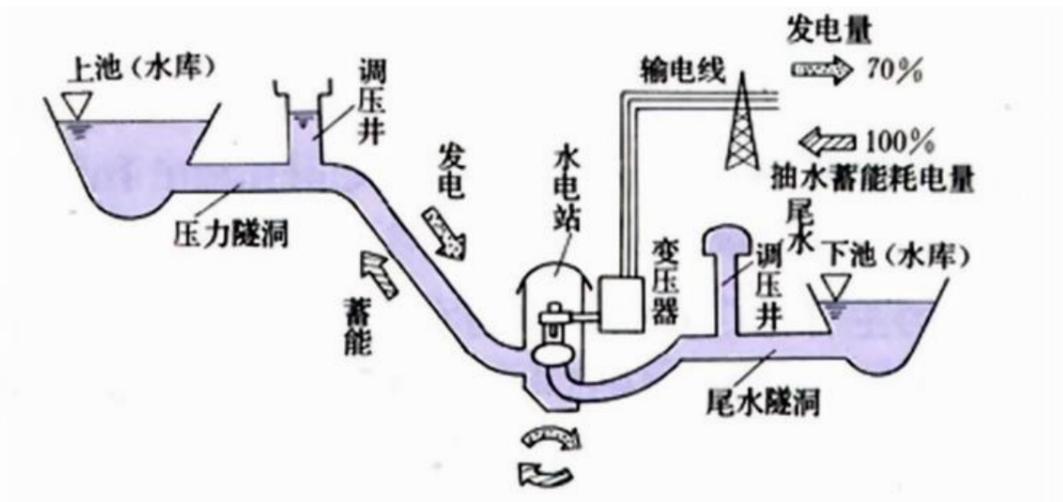




第二章 抽水蓄能

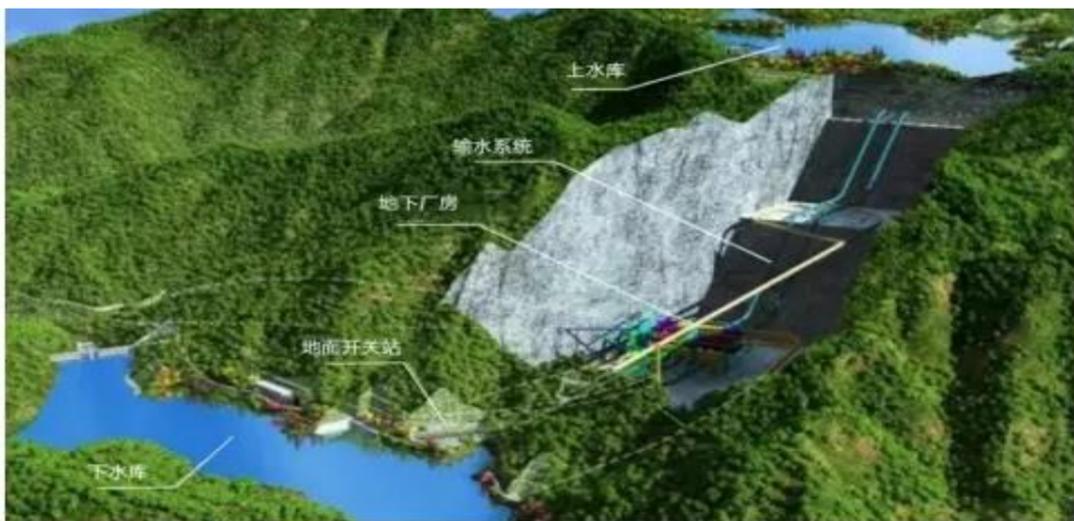
抽水蓄能电站主要由处于高、低海拔位置的上、下水库，以及发电装置和厂房、控制中心组成，是利用电力负荷低谷时的电能自下水库抽水至上水库，在电力负荷高峰期再放水至下水库发电的水电站。抽水蓄能电站可将电网负荷低时的多余电能，转变为电网高峰时期的高价值电能，是技术成熟、使用经济、运行环保的大规模优质储能装置。

图 5：抽水蓄能工程的原理图



来源：百度百科

图 6：抽水蓄能工程的示意图



来源：天风证券

第一节 抽水储能的基本情况

一、抽水蓄能的发展历程

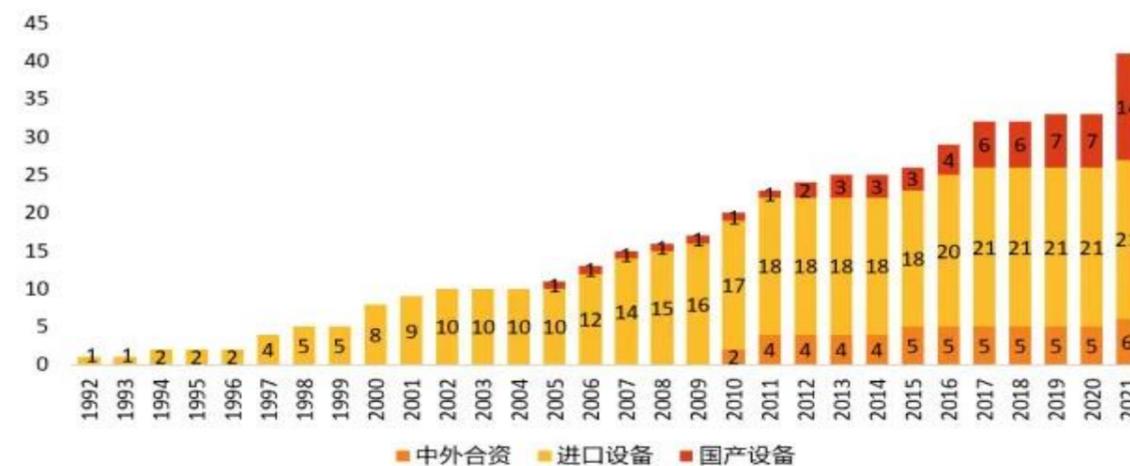
抽水蓄能最早出现在 19 世纪。1882 年世界上第一座抽水蓄能电站在苏黎世建成，一直到 20 世纪中叶，抽水蓄能都发展缓慢，区域主要集中在西欧国家。

随着工业化的发展，20 世纪 60 年代后，抽水蓄能电站因其良好的调峰填谷性能得到迅速发展，美国成为抽水蓄能装机容量最大的国家。

20 世纪 90 年代，西方发达国家的经济增速有所放缓，抽水蓄能电站建设速率下降，但日本由于水力资源丰富，抽水蓄能电站发展迅速，在 1990 年超过美国成为装机容量最大的国家。

进入 21 世纪后，中国、韩国等亚洲国家经济增长速度提升，开始大力发展水电资源，推动了全球抽水蓄能电站装机容量的增长。

图 7：国内抽水蓄能累计已投产的水轮发电机组设备（单位：台）



来源：天风证券

二、抽水蓄能的优点

储能规模较大，寿命长：抽水蓄能是目前最经济的大规模储能技术，在这种储能方式中，当电力需求较低时，多余的电能被用来将水从低处抽到高处的水库中（储能过程）；当电力需求高时，水被释放流回低处，通过水轮机发电。发电过程具有较高的能量转换效率，通常在 70%-85% 之间。意味着如果输入 100 单位的电能，最终能输出 70 到 85 单位的电能，其余的能量通过摩擦或湍流等损失掉了。适用于电网调峰、调频以及应急备用电源。

抽水蓄能系统能够在电力系统中存储大量电能，为电网提供强有力的支撑。国内一些大型抽水蓄能电站的装机容量可达数百万千瓦，有效满足了电网的调峰需求。使用年限达 40-60 年。

启动迅速，运行灵活、可靠：能在短时间内响应电网的调度指令，快速调整发电或抽水状态。这一特点使得抽水蓄能在应对电网负荷的突然变化时表现出色，比如在用电高峰时迅速发电增加供电，在用电低谷时高效抽水蓄能。

运行效率较高，成本低：在各种储能技术中成本较低，仅为 0.21-0.25 元/kwh。全生命周期度电成本低，与锂离子储能技术相比，Energy Vault 基于重力的储能系统平准化成本（资本支出、运营支出等）更低，根据 BNEF 数据，Energy Vault 技术平准化成本是锂离子电池的 60%。

适合承担调频、调相、事故备用等任务：在电网频率出现波动时，它能够迅速调整输出功率，稳定电网频率；在电网相位出现偏差时，它可以进行相位调整，保证电力供应的质量；在电网发生故障或突发情况时，它能够作为紧急备用电源，保障电网的安全稳定运行。

环保性相对较好：运行过程中不产生污染物排放，且可促进可再生能源的消纳，减少弃风、弃光现象，符合现代社会对清洁能源的需求。

三、抽水蓄能的缺点

地理依赖明显：需要特定的地理条件，如具备高低差的合适地形和充足的水资源，这导致其在地理布局上受到很大限制，很多地区因缺乏合适的地理条件而无法建设抽水蓄能电站。

投资成本高：建设抽水蓄能电站包括基础设施建设、水资源管理等方面的投入。需要高昂的资金用于修建上下水库、压力管道、厂房等设施，同时还需要考虑征地、移民等相关费用，导致初始投资成本高昂，一个 120 万千瓦的电站通常需要 60-80 亿元的投资。

建设周期长：从规划、设计到建设完成通常需要较长时间，一般需 6-8 年。

能量转换过程中存在一定的损耗：这对其经济性产生了一定影响。尽管其综合效率相对较高，但仍有部分电能在水泵和发电的过程中损失掉。

一定的环境影响：建设抽水蓄能电站可能会对周边生态环境造成一定破坏，如改变水流模式、影响水生生物栖息地等。

四、抽水蓄能的应用场景

在电网中，抽水蓄能是重要的调峰调频电源，平衡电力供应和需求之间的差异，提高电网的稳定性和可靠性。例如，在用电低谷时将多余的电能储存起来，在高峰时释放，有效缓解电网的压力。

随着可再生能源的快速发展，抽水蓄能成为配合风光等新能源的重要手段。当新能源发电过剩时，抽水蓄能可以将电能储存起来，在新能源发电不足时释放，平滑新能源发电的波动性和间歇性。

在城市周边，中小型抽水蓄能电站的应用也逐渐增多，帮助城市电网更好地应对峰谷负荷变化，提高供电质量。此外，抽水蓄能还可用于偏远地区的电力供应，保障当地的电力稳定。

国家电网是我国最重要的电网企业，其经营区域覆盖中国国土面积的 88% 以上。“十三五”期间，国家电网经营区域内中国抽水蓄能电站发电量年平均 246 亿 KWh，抽水电量年平均 311 亿 KWh，转换效率约 80%。

五、抽水蓄能的未来发展方向

抽水蓄能技术将继续朝着大容量、高水头、高效率的方向发展。同时，随着新型材料和技术的应用，抽水蓄能电站的建设成本将不断降低，建设周期将不断缩短。

- **高压和高容量方面的创新：**抽水蓄能技术在高压和高容量方向的创新旨在满足不断增长的电力需求和应对更复杂的电网环境。例如，研发更高电压等级的设备，以减少电能传输损耗，提高能源利用效率。在容量方面，通过优化设计和采用先进材料，不断提升抽水蓄能电站的单机容量，从而增加整体储能规模。此外，高压和高容量的创新也对电力电子技术、绝缘技术等提出了更高要求，促使相关领域不断进行技术研发和改进。

- **智能化和自动化方面的创新**：在智能化和自动化方面，抽水蓄能技术正经历着深刻的变革。应用人工智能和机器学习技术，能够根据实时的电力需求、电价波动以及可再生能源的输出情况，智能优化抽水蓄能电站的运行策略。先进传感器和远程监控系统的采用，可以实现对电站设备的实时监测和故障预警，大大提高了运维效率和可靠性。构建的智慧调度平台，能够与电网实现更紧密的协调互动，实现灵活调频，更好地适应电网的复杂变化。
- **可再生能源集成方面的创新**：抽水蓄能技术与可再生能源的集成创新是当前能源领域的重要发展方向。将抽水蓄能与风电、光伏等可再生能源相结合，能够有效地解决可再生能源的间歇性和不稳定性问题。在风电场或光伏电站附近建设抽水蓄能电站，当可再生能源发电过剩时，将多余的电能用于抽水蓄能；当可再生能源发电不足时，通过放水发电来补充电网的电力供应。这种集成模式在一些地区已经取得了显著成效，大大提高了可再生能源的利用率，减少了弃风弃光现象。此外，抽水蓄能电站还可以作为可再生能源的备用电源，增强电网对可再生能源的消纳能力，保障电网的稳定运行。
- **多功能化方面的创新**：抽水蓄能技术的多功能化创新使其在能源领域发挥着更为广泛的作用。除了传统的调峰、备用功能外，还拓展了黑启动、调频、调相等多项辅助服务。此外，研究抽水蓄能与海水淡化、储热等其他技术相结合，能实现能源的综合利用。
- **环境友好方面的创新**：在环境友好方面，抽水蓄能技术的创新主要体现在减少水资源消耗和降低对生态环境的影响，减少对河流生态系统的干扰。同时，探索以抽水蓄能电站为核心的绿色能源园区开发模式，促进了区域生态环境的改善。
- **小型化和分散化方面的创新**：抽水蓄能技术的小型化和分散化创新适应了分布式能源和微电网的发展需求。小型抽水蓄能系统的研发，能够满足局部区域的储能需求，如偏远地区、工业园区等。分散化的抽水蓄能电站布局优化了电网结构，提高了供电的可靠性。模块化和预制化抽水蓄能技术的探索，降低了建设成本和缩短了工期，使得更多的小型化项目能够快速落地实施。

抽水蓄能技术的创新方向多样且具有重要意义。这些创新不仅有助于提高抽水蓄能电站的性能和效率，还能更好地适应能源转型的需求，促进可再生能源的大规模应用，为构建稳定、高效、清洁的能源体系提供有力支持。

第二节 抽水蓄能的价值链

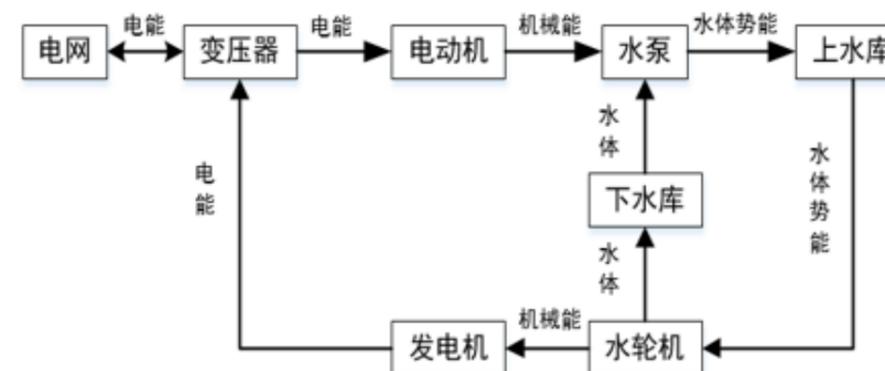
国内抽水蓄能发展比较成熟，已形成较完善的价值链。

图 8：抽水蓄能的价值链



来源：天风证券

图 9：抽水蓄能主要设备的关系示意图



一、储能方式

- 抽水阶段：在电力需求低或电价便宜时，使用电网的多余电能驱动水泵将水从下水库抽到上水库，储存势能。
- 发电阶段：在电力需求高或电价贵时，打开上水库的闸门，让水通过输水系统流向下水库，驱动涡轮机旋转，进而驱动发电机发电。

- 频率调节：抽水蓄能系统可以快速响应电网的频率变化，通过调整水泵和涡轮机的运行状态，帮助维持电网的频率稳定。
- 峰谷负荷调节：通过在电力负荷低谷时储能，在高峰时释放能量，抽水蓄能系统有助于平衡电网的峰谷负荷差异。

二、抽水蓄能的关键技术

抽水蓄能将电网负荷低时的多余电能，转变为电网高峰时期的高价值电能。适用于调频、调相，稳定电力系统的周波和电压，还可提高系统中火电站和核电站的效率。尽管抽水蓄能技术在多个国家得到了广泛应用，但在绿色可持续方面，仍存在提升空间。

1. 水泵和涡轮机设计

水泵和涡轮机是抽水蓄能系统的核心组件，它们的设计和运行效率直接影响整个系统的能源转换效率。

水泵的设计和制造过程中存在材料消耗大、能耗高等问题，从以下几个方面考虑：

- 效率：水泵的效率直接影响整个储能系统的经济性。高效率的涡轮机可以最大化地利用水能，提高发电效率。
- 材料：通过采用更高效的材料和制造工艺，减少材料消耗和废物产生。水泵的材料需要能够承受高压和高速水流的侵蚀，通常采用不锈钢、高强合金钢等耐腐蚀材料。
- 密封系统：良好的密封系统可以防止水泄漏，保证水泵的长期稳定运行。

涡轮机的设计需要考虑以下几个关键因素：

- 效率：涡轮机的效率决定了能量转换的效果。
- 适应性：涡轮机需要能够适应不同的水流条件，包括流量和水头的变化。
- 维护：涡轮机的设计应便于维护和检修，以减少运行中的停机时间。

2. 上水库和下水库

上水库和下水库的设计和建设是抽水蓄能系统的基础设施，对环境和社会影响深远。

上水库的设计需要考虑以下几个关键因素：

- 生态影响：水库建设可能对当地生态系统造成破坏，如栖息地丧失和生物多样性下降。在水库设计中融入生态友好的元素，如生态友好的防渗材料和生物多样性保护措施。
- 容量：上水库的容量需要足够大，以满足储能系统的需求。
- 地形：上水库的选址需要考虑地形条件，以便于水的储存和释放。
- 水资源管理：水库的运行需要大量水资源，可能与当地社区和农业用水需求发生冲突。通过水资源管理计划，确保水库运行与当地水资源需求之间的平衡。

下水库的设计需要考虑以下几个关键因素：

- 稳定性：下水库需要有足够的稳定性，以承受水流的冲击。
- 容量：下水库的容量需要足够大，以储存从上水库释放的水。
- 环境影响：下水库的建设需要考虑对周围环境的影响，采取措施减少破坏。进行全面的环境风险评估，识别潜在的环境风险，并采取相应的缓解措施。

3. 输水系统

输水系统是连接上下水库的管道或渠道，负责将水从上水库输送到下水库，或从下水库输送到发电站。

输水系统的设计需要考虑以下几个关键因素：

- 材料：输水系统建设需大量材料，易造成资源消耗与环境破坏。其材料要能承受高压、高速水流侵蚀，常用钢管、混凝土、塑料等。可选择再生塑料、环保混凝土这类可持续材料，以减少环境影响。
- 防渗：输水系统若发生泄漏会造成水资源浪费与环境污染，因此要做好防渗措施以防止水的流失，同时实施泄漏监测与快速响应机制，以减少水资源浪费。
- 维护：抽水蓄能系统的运行需要精确的控制，以确保在正确的时间进行抽水和发电。输水系统的设计应便于维护和检修，以减少运行中的停机时间。

三、抽水蓄能的 EPC 模式

抽水蓄能产业链中游是整个抽水蓄能项目的核心部分，主要涉及电站的规划设计、建设施工，以及电站的运营管理。这些环节是将抽水蓄能技术转化为实际应用的关键，直接影响项目的经济性、运行效率和长远发展。

EPC 模式（设计-采购-施工总承包模式）已经成为国内抽水蓄能建设的主流。EPC 模式是指由承包商全权负责项目的设计、设备材料的采购以及工程的施工，最终交付一个符合合同要求的、能够正常运行的项目。这种模式在国内的基础设施建设领域广泛应用，尤其在技术复杂、建设周期长、投资规模大的抽水蓄能项目中，EPC 模式的优势较为突出。

抽水蓄能产业链中游的代表性企业有中国电建、中国能建，其中中国电建在国内抽水蓄能规划设计市场的份额约占 90%，承担建设项目市场的份额约占 80%，是国内抽水蓄能规划设计+建设的龙头。自成立以来承担了我国大部分抽水蓄能电站的规划、勘测设计、施工建造、设备安装、工程监理等工作，已形成全面的抽水蓄能电站规划、设计、施工技术能力。

中国电建在中国湖南省的白鹤滩抽水蓄能电站项目是该技术的一个代表性实例。该项目利用当地的地形优势，通过建设上、下两个水库，在电力需求低谷期将水抽到高位水库储存，需求高峰期则释放水流发电，这一过程不仅平衡了电力供需，还提高了电网的稳定性和可靠性。白鹤滩项目的设计容量达到了 3600MW，足以为湖南省及其周边地区提供可靠的电力调峰和频率调节服务。

这个项目不仅在技术上具有先进性，还在环保和社会效益方面作出了巨大贡献。首先，白鹤滩项目的选址和建设过程中，进行了严格的环境影响评估，确保对当地生态系统的影响最小化。其次，该项目创造了大量就业机会，促进了当地经济的发展。此外，项目运营中采用了先进的能效管理系统，大幅降低了运营期间的能源消耗和碳排放。

白鹤滩项目的成功运行不仅巩固了中国电建在全球抽水蓄能市场的领先地位，也为全球类似项目提供了宝贵的经验。该项目展示了抽水蓄能技术在大规模可再生能源并网中的关键作用，是推动中国清洁能源转型的重要组成部分。

第三节 抽水蓄能的发展情况

在国外发展现状方面，不同国家有着不同的举措与特点。美国联邦能源监管委员会（FERC）制定相关法规，给予抽水蓄能项目市场准入和电价政策支持；日本政府采用补贴与税收优惠方式，激励抽水蓄能项目发展并促进其在电网中的应用。德国在技术创新与研发投入上表现突出，大力投入抽水蓄能技术研发，着重研究提升系统效率与降低环境影响的技术。挪威则凭借丰富水资源，建设多个抽水蓄能电站，构建起较为完善的产业生态与基础设施。

中国在抽水蓄能领域发展迅猛，于“十四五”规划中明确了加快其发展的计划。当前，中国抽水蓄能装机容量持续攀升，技术稳步向前推进，成本逐步下滑，市场蕴含着巨大潜力。在政策支持层面，政府颁布了诸如《抽水蓄能中长期发展规划（2021-2035 年）》等一系列政策助力行业发展；在技术创新方面，国内企业与研究机构在提升抽水蓄能效率、削减成本以及环境影响评估等领域斩获显著成果；在基础设施建设上，中国已在众多地区构建起大型抽水蓄能项目，力求满足持续增长的能源存储需求。

全球范围内抽水蓄能技术有着诸多应用案例：

- 中国河北省的丰宁抽水蓄能电站，总装机容量 3.6GW，位居世界之首；
- 美国弗吉尼亚州和西弗吉尼亚州交界处的巴斯康蒂抽水蓄能电站，总装机容量 3GW，为美国最大；
- 日本长野县的葛尾抽水蓄能电站，装机容量 1.4GW，为日本最大；
- 德国巴伐利亚州的马克克尔多夫抽水蓄能电站，总装机容量 1GW，是欧洲较大的。

这些案例体现了抽水蓄能技术在全球的广泛应用，且随着技术与成本的发展，其在未来能源系统中将更为关键。

在国内，抽水蓄能投资主体呈多元化态势。除电网经营企业如国家电网、南方电网外，传统电源企业如三峡、中国电建、国能、国家电投、华电，以及地方企业如杭州钢铁集团、湖南湘投集团等纷纷涉足抽水蓄能建设领域，为市场注入了活力。

- 中国电建（601669）身为国内水利水电建设的龙头老大，承建了惠州、广州等大型抽水蓄能电站，在规划设计与建设方面市场份额突出；
- 南网储能（600995）作为主营抽水蓄能的上市公司，积极响应双碳目标，在节能降本增效、减缓气候变化影响等环境、社会与治理方面成果斐然；

- 东方电气（600875）作为抽蓄机组主要设备厂商，在大型水轮发电机技术上底蕴深厚，水电产品总体水平国内居前，贯流式、混流式等水电技术达国际领先；
- 哈尔滨电气同样是抽蓄机组主要生产企业，在水电设备研发制造经验丰富，在国内水轮发电机组的市占率超过 50%；
- 国电南瑞作为电力系统二次设备供应商，在抽水蓄能电站技术与产品上较为全面，参与众多抽蓄电站建设；
- 三峡集团作为全球最大水电开发运营企业，旗下长江电力坐拥多座大型水电站，在清洁能源领域地位显著。

这些企业在抽水蓄能领域处于领先地位，并且在推动环境保护、践行社会责任以及构建良好治理结构等方面均发挥着极为重要的作用。

第四节 南网储能的抽水蓄能

南网储能作为南方电网旗下唯一的抽水蓄能和电网侧独立储能运营平台，肩负着重要的使命与责任。它在能源领域的影响力不断拓展，不仅于能源供应与调配方面发挥关键作用，在可持续发展的进程中也表现突出。

一、绿色施工管理

南网储能的抽水蓄能电站绿色施工管理评价标准，对提升抽水蓄能电站建设期间的环境保护与水土保持管理水平意义重大。绿色施工管理以保障工程质量与施工安全为基础，凭借科学管理与技术创新，实现资源节约与环境保护的双重目标。

- 在目标数据过程管理和考核方面，把绿色施工创奖、综合能耗、建筑垃圾排放量、再生利用率等指标纳入年度单位绩效考核体系，并与员工绩效相联系，以此激发全体员工踊跃投身绿色建造。例如，项目部会确立绿色施工目标，对能耗、垃圾排放等数据展开监测，再依据绩效考核结果对团队成员予以奖励。
- 对于材料、水、能源利用优化，优先选用可回收且环保的建筑材料以降低浪费。施工用水方面，充分利用基坑降水、地表湖水、河水以及雨水，经沉淀处理后实现循环再利用。同时，借助太阳能和空气能供应生活热水，削减能源消耗。像安装风力和太阳能路灯、太阳能热水器，并运用智能配电控制，从而减少用电与用水。

- 施工用地保护上，提前修筑临时道路，以降低后期时间与物资的损耗。采用可移动式钢筋防护棚，缩减土地硬化面积。比如遵循“永临结合”原则，依照正式道路规划来修筑临时道路。
- 在环境保护环节，设立洗车台、防尘天幕、全覆盖降噪棚等设施，满足降尘、防雨、降噪等多方面要求。如使用立体式洗车台、防尘天幕，有效减少水资源浪费与粉尘排放。

绿色施工管理旨在确保工程质量和施工安全的前提下，通过科学管理和技术进步，达到节约资源、保护环境的目的。

二、科技创新

南网储能依靠持续的科技创新来提升自主技术创新能力，加大研发投入，着重聚焦可变速技术、储能技术等领域。

科技创新是南网储能公司提升自主技术创新能力的另一大驱动力。公司不断加大研发投入，聚焦可变速技术、储能技术等领域，通过建设智能充电站、钠离子电池储能电站等项目，推动了储能技术的创新和应用。

- 开放共享平台：鼓励大企业、科研院所积极打造创新资源开放共享平台，推动国家重大科研基础设施、科学数据以及仪器设备面向社会开放。例如，南网储能与国内知名大学合作，建立了一个创新实验室，这个实验室不仅配备了最先进的设备，还汇集了来自不同领域的专家和学者。
- 倡导创新创业文化：大力弘扬创新创造精神、企业家精神、工匠精神，让尊重劳动、尊重知识、尊重人才、尊重创造成为一种良好风尚。南网储能设立了“创新奖励基金”，鼓励员工提出创新点子。从改进工作流程的小建议到突破性的技术方案，每一个被采纳的点子都能获得奖励。这种文化激发了员工的创新热情，让公司充满了活力和创造力。

三、环境保护与气候变化应对

南网储能公司积极落实国家“1+N”政策体系，推动绿色低碳发展，减少碳排放。公司通过加大对新能源项目的投资，如风电和太阳能发电，促进能源结构的优化，为实现碳达峰目标奠定了坚实的基础。

公司坚持走绿色低碳发展道路，将绿色发展理念融入企业战略。坚定地将绿色发展理念奉为应对气候变化的关键准则，例如全力推动可再生能源的开发利用，逐步降低对传统化石燃料的过度依赖。通过建设抽水蓄能电站，南网储能公司不仅提供了清洁的电力资源，还通过推动“新电气化”进程，促进了能源消费方式的变革。

南网储能在推动能源结构转型的同时，注重减污降碳的协同治理。通过优化电站的运行管理，提高能源利用效率，减少污染物排放，实现了环境效益与经济效益的双赢。包括建设污水处理系统和加强污水废水排放检测，实现了废水全部达标排放。

南网储能认识到增强生态碳汇能力的重要性。通过保护和恢复森林、湿地等自然生态系统，公司增加了碳吸收能力，为减缓气候变化做出了积极贡献。

四、社会责任与社区贡献

南网储能通过推进节能降本增效，减缓气候变化影响，如在电站建设中推广应用绿色环保技术、设备，阳蓄电站荣获“国家水土保持示范工程”称号。

公司通过奖学金、实习项目和学校捐赠提升教育质量，帮助年轻人获得更好的教育和职业准备。资助健康和福利计划、改善公共设施、支持艺术和文化活动，与社区成员建立紧密联系。开发新技术、创造新的商业模式来解决社会问题，提高效率、解决贫困和饥饿问题。增强消费者和群众的信任，在全球供应链中促进公平交易。

五、乡村振兴与可持续发展

南网储能坚持产业思维，发展可持续的产业，将绿色环保、可持续发展与提升农村经济效益紧密融合。例如，公司在回龙镇及周边地区开展了新丰抽水蓄能电站选点工作，于 2022 年 5 月正式启动了项目前期工作。电站总投资预计约 80 亿元，建设期间，每年可提供各类就业岗位约 3000 个，将辐射带动建筑业、农业和服务业等产业发展。

公司将企业产业优势和帮扶地区资源禀赋结合起来，在回龙镇及周边地区开展了新丰抽水蓄能电站选点工作。公司累计向回龙镇捐赠资金超过 200 万元，积极参与“千企帮千镇、万企兴万村”行动，发挥企业专业优势，结合帮扶点资源禀赋开展了抽水蓄能电站选点，探索通过产业投资推动帮扶地区乡村振兴的新路径。

六、安全生产与质量管理

南网储能以其卓越的安全生产和质量管理，在抽水蓄能行业中树立了新的标杆。这家公司的故事是关于如何通过规范公司治理，提升自主技术创新能力，从而推动社会进步和经济发展的典范。

公司定期进行安全检查和维修，及时发现并维修属地安全隐患。例如，通过开展“安全生产月”活动，加强员工的安全意识和操作技能培训，确保每位员工都能掌握必要的安全知识和技能。

公司建立了一套明确的安全规程，并确保所有人员严格按照规程执行工作。

- 使用先进的安全技术和设备，确保作业安全。在电站建设过程中，公司严格执行安全操作规程，确保每一项工作都在安全的条件下进行。
- 与建设单位、设计单位、监理单位、总包单位、检测单位和专业分包单位等参建各方成立“技术管理委员会”、“安全管理委员会”、“质量管理委员会”，作为重要的管理力量。
- 推动工程管理精细化，提高项目安全文明和建造品质。通过分级管理，公司确保了项目的每一个环节都有严格的质量控制和安全监管。

为了有效降低场内车辆伤害风险，采取了人车分流、限速、限高等场内车辆管理安全措施。在电站施工现场，设置限高线和限宽线，规范车辆通行，确保施工现场的交通安全。

七、供应链管理

通过数据的高度整合和可视化，实现了供应链活动的实时监测。使用先进的数据可视化工具，跟踪库存、订单状态、运输进度等信息，确保供应链的透明度和效率。

在供应链管理中采用自动化和智能化技术，减少人工干预，提高生产和配送效率。例如，实施了自动化仓库管理系统和智能物流路线规划，以提升供应链的运作效率。

鼓励供应链参与者之间的协同合作，确保产品快速流向市场。与供应商、物流公司建立紧密的合作关系，共同优化供应链流程，实现供应链的快速响应和高效运作。

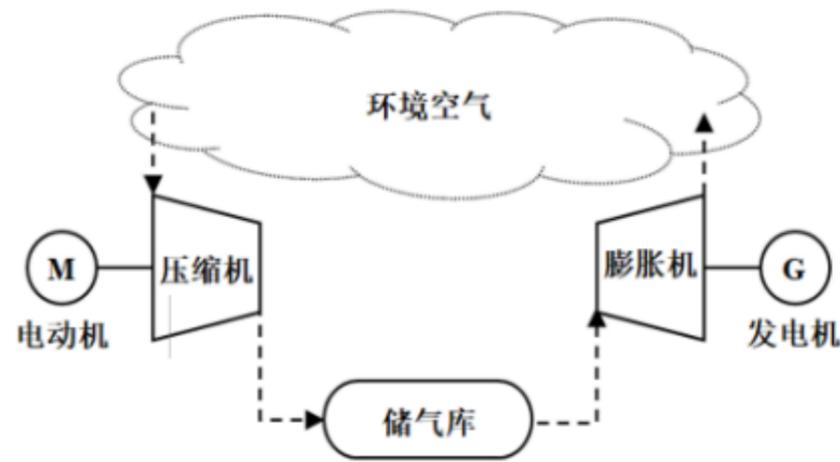
利用高级数据分析和决策支持系统，更好地了解供应链瓶颈、短缺和风险。使用预测模型来优化库存管理，减少过剩库存和缺货风险，确保供应链的稳定性和可靠性。

The background image shows a vast field of golden wheat in the foreground. In the middle ground, several wind turbines are silhouetted against a dramatic sunset sky with orange and blue clouds. The overall scene is peaceful and represents renewable energy.

第三章 压缩空气储能

压缩空气储能是一种利用电能将空气压缩并储存，在需要时释放高压空气推动透平机发电的储能方式。这种技术具有规模大、寿命长、成本低、环保无污染等优点，被视为最具发展潜力的大规模储能技术之一。

图 10：压缩空气储能系统基本原理示意图



来源：电气传动杂志

压缩空气储能的原理是，以压缩空气作为能量载体，储能过程中，电动机驱动压缩机从环境中吸取空气，并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；释能的过程中，储气装置中存储的压缩空气进入空气透平（即空气涡轮机）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。

第一节 压缩空气储能的基本情况

一、压缩空气储能的发展历程

1949 年，Stallaval 提出压缩空气储能技术。

1978 年，德国投入商业运行第一座压缩空气储能电站-Huntorf 电站。传统压缩空气储能系统依赖化石燃料、大型储气室且效率较低，发展受到限制。因此，国内外学者在此基础上进行改进，如通过优化热力循环、改变工质或其状态、与其他技术互补等，开拓出多种新型压缩空气储能技术。例如，有的技术通过回收利用空气压缩过程中产生的压缩热，提高了系统效率；还有的技术尝试采用不同的储气方式，以摆脱对大型储气洞穴的依赖。

2014 年，中国科学院工程热物理研究所先后建成国际首套 1.5MW 级超临界压缩空气储能系统集成实验与示范平台，完成 10MW 先进压缩空气储能系统示范运行，并开展相关实验、优化升级 10MW 透平膨胀机，还完成了 100MW 级压缩空气储能系统方案及关键部件设计。

2022 年，江苏金坛压缩空气储能电站（60MW×5 小时）整体并网发电，该电站采用非补燃技术，对压缩热进行储存并在膨胀做功时回馈热量，电-电效率达 62%，其成功验证了压缩空气储能商业化应用的可行性，标志着我国压缩空气储能技术迈向新台阶。

二、压缩空气储能的优点

大规模储能能力：能够存储大量的能量，适合 GW 级大规模电力储能，可实现单机功率数百兆瓦甚至吉瓦级的储能容量。

高安全性：系统运行稳定，没有易燃物质，安全性高。

长寿命：设备使用寿命长，一般可储释能上万次，寿命达 30-50 年。

经济环保：新型压缩空气储能技术不依赖化石燃料，减少了温室气体排放，能够实现碳中和；若采用盐穴等作为储气库，改造成本低。

建设周期短：相比抽水蓄能，压缩空气储能的建设周期更短，一般为 12-18 个月。

快速响应：能够快速响应电网需求，在短时间内提供或吸收大量的电能，从而维持电网的频率和电压稳定。

选址灵活：相比抽水蓄能电站，站址选择灵活，不需建造地面水库，地形条件容易满足；可以利用地下盐穴、人工硐室等作为储气装置，例如我国盐穴资源丰富，主要分布在山东、江苏、安徽、湖北、陕西等地，除盐穴外，还可采用人工挖掘建设储气库。

三、压缩空气储能的缺点

地理条件限制：传统压缩空气储能系统需要特殊的地理条件，如岩石洞穴、盐洞、废弃矿井等用于储存高压空气，虽然现在人工硐室技术在推广，但一定程度上仍受地理条件制约。

效率问题：传统压缩空气储能系统的效率一般在 40%-55%之间，相比抽水蓄能的 80%效率较低，不过随着技术发展，系统效率在持续提升，不少电站能达到 65%-70%。

成本问题：初始投资成本相对较高，尤其是在考虑到压力容器和地下储存设施的建设成本时。

技术成熟度：虽然技术已经取得了一定的进展，但在某些应用场景中仍需进一步的技术突破和验证。

环境影响：如果使用传统的补燃式压缩空气储能技术，燃烧化石燃料可能会对环境造成一定的影响。

四、压缩空气储能的应用场景

相比于抽水蓄能需要具备合适的上下水库地形以及较大的落差，因此通常建设在山区等有地势起伏的地方。同时为了保证足够的水量和水头，对水源和地形的要求较高，选址受到较大限制。而压缩空气储能对地理条件的要求相对灵活，可以利用地下盐穴、废弃矿井、岩洞等作为储气空间。

从建设周期和成本方面，压缩空气对比抽水蓄能而言，建设周期相对较短，尤其是利用现有地下空间改造的项目，建设速度较快。在成本方面，虽然前期的设备投资和工程建设费用较高，但后期的运行维护成本相对较低，且随着技术的不断进步和规模效应的显现，成本还有进一步下降的空间。

压缩空气储能除了可以用于电力系统的调峰填谷、辅助服务等常规应用场景外，还可以在一些特殊场景发挥作用。例如，在偏远地区、海岛等缺乏常规能源供应的地方，压缩空气储能可以与当地的可再生能源结合，实现能源的自给自足；在工业领域，压缩空气储能可以利用工业生产过程中的余热、余压等进行储能，提高能源的综合利用效率。

五、压缩空气储能的未来发展方向

2023 年底，国家能源局公示新一批新型储能试点示范项目，共有 56 个项目列入，该名单包含了压缩空气、全钒液流、重力储能、飞轮等多种项目类型，其中压缩空气储能项目达到 11 个（不含二氧化碳储能），成为最亮眼的新型储能技术路线。

压缩空气储能上下游产业链成熟。上游包括空气压缩机、透平膨胀机、蓄热换热系统储气盐穴资源等；中游层面目前国内压缩空气储能的技术积累与项目建设已做到全球领先；下游环节，压缩空气储能电站接入电网系统，服务于工业用电、商业用电、居民用电等部门，起到调峰、填谷、调频、调相、储能、事故备用等关键作用。

效率提升、成本下降，商业化进程加速。随着技术的进步，系统效率不断提升，例如，通过优化压缩和膨胀过程、改进热管理策略以及采用新型材料和设计，都有助于提高能量转换效率。此外，蓄热式

和超临界压缩空气储能等创新技术也在研发之中，这些技术通过更高效地利用压缩过程中产生的热量，进一步提升系统的整体性能。2013 年廊坊项目效率为 52%，2022 年泰安 350MW 项目效率提升 70%。同时，随着技术规模化和产业链的成熟，压缩空气储能项目建设成本呈下降趋势，2021 年肥城 10MW 项目单位成本为 11000 元/KW，但是 2022 年立项的 200MW 项目成本只有 5000 元/KW，单位成本下跌趋势较快，提效降本趋势下压缩空气储能商业化进展有望迎来快速发展。

中国能建项目加成，商业化场景初步落地。2022 年以来，中国能建已开工的 300MW 级压缩空气储能项目有包括湖北应城 300MW 级压缩空气储能等 4 个项目。拟建的 300MW 级压缩空气储能项目多达 7 个，包括甘肃金昌 300MW 级压缩空气储能电站及辽宁铁岭 300MW 级压缩空气储能电站等项目。

第二节 压缩空气储能的产业链

国内压缩空气储能的产业链已逐渐形成。

图 11：压缩空气储能的产业链



来源：根据 ESCN 中国储能网资料整理

一、上游：设备

上游设备主要包括空气压缩机、膨胀机、储气装置、换热器、电源管理系统等。

1. 压缩机和膨胀机

压缩机和膨胀机是最主要的设备，分别对空气进行压缩和复原，完成能量的转化。设备要满足以下技术要求：

- 高效能：具备较高的压缩效率和能量转换效率，以减少能源浪费和提高储能系统的整体效率。
- 稳定性：能够在长时间内稳定运行，保持压缩过程的连续性和可靠性。
- 耐用性：具有良好的耐磨、耐腐蚀性能，以适应恶劣的工作环境和长期使用的需求。
- 易维护性：结构设计合理，便于维护和保养，降低维护成本和停机时间。

目前，国内外已有多家企业能够生产满足压缩空气储能系统需求的空气压缩机。这些企业在压缩机技术方面具有较高的水平，能够生产出具有国际竞争力的产品。随着压缩空气储能技术的不断发展和市场需求的增加，空气压缩机的市场规模也将不断扩大。

2. 换热器

换热器是压缩空气储能技术中的另一个主要设备，负责在压缩和释放空气的过程中进行热量的交换，以提高系统的整体效率。

在压缩空气储能系统中，当空气被压缩时，会产生大量的压缩热，这些热量通过换热器被回收并储存起来；在需要释放空气时，换热器将储存的热量传递给空气，使其温度升高，从而提高膨胀机的效率。

换热器要满足以下技术要求：

- 高效换热：具有较高的换热效率，能够充分回收和利用压缩过程中产生的热量。
- 承压能力强：能够承受系统工作压力和温度波动的影响，确保长期稳定运行。
- 耐腐蚀性好：能够适应压缩空气储能系统中可能存在的腐蚀性气体或液体环境。

随着压缩空气储能技术的不断发展和市场需求的增加，满足该系统需求的换热器市场也在不断扩大。国内外多家企业致力于研发和生产高效、可靠的换热器产品，以满足不同规模和类型的压缩空气储能系统的需求。

3. 储气装置

储气装置是压缩空气储能技术中的核心组成部分，负责在储能过程中储存高压空气，并在需要时释放这些空气以驱动透平机发电。

根据材料、结构和应用场景的不同，满足压缩空气储能系统需求的储气装置可以分为多种类型。

◆ 天然地下洞穴储气

- 特点：天然地下洞穴，如盐穴、含水层和硬岩层洞穴，具有规模大、成本低的优势。盐穴具有两个关键的特性。一是密封性好，能够有效防止物质泄漏。二是力学性能强大，即便面临巨大的重量负荷或高压环境，盐穴依然可以保持形态稳定，不会轻易发生变形或损坏。基于这些特性，盐穴在压缩空气储能领域获得了广泛的应用与推广。
- 实例：德国 Huntorf 电站和美国 McIntosh 电站均采用深埋地下的天然盐穴作为储气装置，储气规模分别达到数十万立方米，储气压力可达数十兆帕。德国 Huntorf 电站于 1978 年建成，利用盐穴储气，效率达 42%，是最早商业运行的压缩空气储能电站之一。美国 McIntosh 电站于 1991 年建成，同样使用盐穴储气，效率提升至 54%，同样是早期的商业运行电站之一。

◆ 人工硐室储气

- 特点：在缺乏天然洞穴的地区，可以建造人工硐室来储存压缩空气。这些硐室通常需要加一层“保护壳”并密封处理，以确保其承压能力和密封性。
- 实例：瑞典和韩国等国家已建成或计划建设人工岩洞储气装置，通过混凝土衬砌和钢板加强密封，实现高压空气的储存。

◆ 金属材料储气装置

- 特点：金属材料储气装置，如圆筒形储罐和球形储罐，具有密封性好、运行稳定性高、设计制造技术成熟等优点。这些储气装置可以根据需要灵活布置，适应不同规模的压缩空气储能系统。
- 应用：金属材料储气装置在压缩空气储能系统中得到广泛应用，特别是在地面空间有限或需要快速部署的场合。

◆ 复合材料储气装置

- 特点：复合材料储气装置，如柔性复合材料高压储气装置，具有质量轻、承压能力强、密封性好等优点。
如中国科学院工程热物理研究所研发的水下恒压压缩空气储能技术中，就采用了闭式柔性储气装置和开式刚性储气装置两种类型的复合材料储气装置。

储气装置要满足以下技术要求：

- 储能规模：根据压缩空气储能系统的储能规模选择合适的储气装置类型和容积。
- 地理位置：考虑当地的地质条件和地下空间资源情况，选择适合的储气方式（如天然地下洞穴储气或人造洞室储气）。
- 成本效益：综合考虑储气装置的建设成本、运行成本和维护成本，选择性价比高的储气方案。
- 安全性：确保储气装置具有良好的密封性和承压能力，以防止气体泄漏和事故的发生。
- 环保性：考虑储气装置建设和运营对环境的影响，选择环保、可持续的储气方案。

二、中游：技术提供与项目建设

压缩空气储能产业链的中游是技术提供与项目建设方。目前国内压缩空气储能的技术积累与项目建设已做到全球领先。主要的技术提供方是中科院热物理研究所下属的中储国能，以及清华大学等高校。项目建设的参与企业则包括中国能建、中国电建等施工单位。

中国能建参与的江苏金坛压缩空气储能项目是目前国内最大的 CAES 项目之一，具有 300 MW 的装机容量。这一项目通过利用当地的地下盐穴储存压缩空气，在电力需求低谷期利用廉价电力将空气压缩储存，需求高峰时释放空气以驱动涡轮机发电，实现了高效的能量转换和长时间的能量储备。此类项目不仅在技术上取得突破，还为中国的 CAES 技术积累了丰富的工程经验和数据，为未来的项目建设提供了参考。

随着压缩空气储能技术的不断发展和成本的逐步下降，CAES 在能源储存市场中的潜力将进一步释放，这一领域也将吸引更多的投资与合作，为全球能源转型和电力系统的高效运行贡献重要力量。

第三节 压缩空气储能的关键技术

按空气在压缩、膨胀过程中热量的管理方式及空气的储存状态，压缩空气储能分为传统与新型两大技术路线。

- 传统压缩空气技术系统为补燃式系统，补燃式压缩空气储能技术成熟度高，它是在储气室后端使用燃烧器来燃烧化石能源提升空气温度使其膨胀进而发电，但这一技术依旧使用化石能源，不符合现阶段绿色低碳转型的方向。
- 新型压缩空气储能中，应用最多且技术相对成熟的是绝热压缩空气储能该技术。其突破性在于，使用换热器将压缩空气时产生的热量存储至储热装置中，而后利用存储的压缩热在释放高压空气时对其进行加热，由于不使用化石能源，因此能实现真正的无碳。

其他新型压缩空气储能还包括蓄热式压缩空气、等温式压缩空气、液态空气储能、超临界压缩空气储能和先进压缩空气储能等。

- 蓄热式压缩空气储能：当压缩机具有高的压力比时，会导致空气在压缩机出口处的温度过高，使得压缩机功耗增大。为了降低压缩机排气温度，在压缩机间采用了级间冷却的方式，由此诞生出蓄热式压缩空气储能。该技术与绝热压缩空气储能运行过程基本相同。

国内蓄热式压缩空气储能技术包括：江苏金坛 60MW 压缩空气储能项目于 2022 年 5 月并网；河北张家口 100MW 压缩空气储能项目于 2022 年 9 月并网；湖北应城 300MW 压缩空气储能项目、甘肃酒泉 300MW 压缩空气储能项目正在建设中。

- 等温压缩空气储能：通过特殊的换热温度控制手段，使得空气在压缩和膨胀过程中的温度变化很小，接近于等温过程。这种技术需要实时解耦和耦合压缩热能和压力势能，以避免压缩空气发生较大的温变。其核心在于在压缩和膨胀过程中保持空气温度近似恒定，从而提高系统的整体效率。
等温压缩空气储能技术已在美国 New Hampshire 州和 Texas 州开展了示范项目，分别达到 1.5 MW/1.5 MWh 和 2 MW/500 MWh 的规模。
- 液态压缩空气储能：是一种高效的储能解决方案，基于空气液化相变特性，利用电能驱动压缩机将环境空气压缩至高压状态，然后通过换热器冷却并液化，存储在低温储罐中。在释放能量时，液态空气被加热并重新气化，随后在膨胀机中膨胀，驱动发电机产生电能。

目前，英国 High view 公司于 2010 年建成 350kW/2.5MWh 液态压缩空气储能示范项目并投入运行，并开展 5MW/15MWh 示范电站；中科院工程热物理研究所于 2013 年在廊坊建成 1.5 MW 示范系统。

2024 年 8 月，我国青海格尔木 60MW 液态空气储能示范项目开工。该项目规模为 60MW/600MWh，是液态空气储能领域发电功率世界第一、储能规模世界最大的示范项目。

作为项目压缩模块的关键设备，压缩机组叶轮直径达到 2 米，整机重量相当于五十头成年大象的重量总和，是世界最大规模的水平剖分式离心压缩机组，具有整机实现快速一键启停、耐疲劳性强、四季节能降耗运行等特点，性能达到国际领先水平。

图 12：青海格尔木液态空气储能示范项目的压缩模块



来源：网络

- 超临界压缩空气储能：利用空气在超临界状态下的特殊性质来存储和释放能量。在超临界状态下，空气的密度大幅增加，体积显著减小，且不再区分液态和气态，这使得能量密度极高，有助于实现大规模能量储存。

目前，超临界压缩空气储能技术已在一些项目中得到应用。例如，中国科学院工程热物理研究所提出并拥有完全自主知识产权的超临界压缩空气储能技术，解决了传统压缩空气储能系统受地理条件限制和需要消耗化石燃料的问题。

第四节 压缩空气储能的发展情况

压缩空气储能市场规模正在全球范围内扩大，特别是在中国、美国和欧洲等对可再生能源整合需求较高的地区。预计未来 5 年的复合年增长率将达到 50%，到 2030 年，全球压缩空气储能装机容量有望超过 10GW，中国市场预计将贡献重要份额。

目前，美国在压缩空气储能领域占据最大的市场份额，占比达到 46%，中国的市占率为 7%。

表 2：全球主要地区压缩空气储能的发展

地区	累计装机量	占比
美国	1164 MW	46%
欧洲	1000 MW	40%
中国	182MW	7.2%
其他	183 MW	7.3%

1. 压缩空气储能的具体应用

全球范围内，多个具有代表性的压缩空气储能项目已经投入运营或正在建设中。截至 2023 年底，国外已投运的项目共 16 个，累计装机容量约 2500MW。

- 美国德克萨斯州的 McIntosh CAES 项目是全球最大的压缩空气储能电站之一，具有 110MW 的装机容量，为当地电网提供调峰服务。
- 德国的 Huntorf CAES 电站作为世界上首个商业化的压缩空气储能项目，在稳定运行中。
- 加拿大 Hydrostor Inc. 专注于开发利用地下洞穴存储压缩空气的大型储能系统，其技术能够实现大规模长时储能。Hydrostor 已经在戈德里奇镇拥有一个商业运营的压缩空气储能设施。规模方面，最大输出功率为 1.75MW，储存容量为 10MWh，在当地电力系统中发挥了一定的储能和调峰作用。该项目展示了压缩空气储能技术在不同地区和应用场景下的可行性，虽然规模相对较小，但为加拿大的压缩空气储能技术发展提供了实践经验，也为其他具有类似能源需求和资源条件的国家提供了借鉴。

美国在压缩空气储能领域之所以处于领先地位，主要有三大原因。

- **政策与市场激励：**美国政府通过实施强有力的政策支持，如联邦投资税收抵免（ITC）政策等激励措施，鼓励用户安装可再生能源发电系统，并已将此政策扩展到新能源与储能混合项目，最高可抵免 30% 的前期投资额。
这些政策不仅降低了储能项目的初期投资成本，也为储能系统参与市场运营提供了有利条件。此外，美国成熟的电力市场体系允许储能资源在电能量市场、辅助服务市场和容量市场中公平竞争，确保了储能项目的经济效益。
- **技术创新与研发投入：**美国在压缩空气储能技术的研发方面投入巨大，包括在关键技术研究、系统集成和示范项目上的持续投入。这些研发活动推动了压缩空气储能技术的创新，如蓄热式压缩空气储能和液态压缩空气储能等新型技术的发展，提高了系统效率，并降低了对化石燃料的依赖。美国拥有商业运行的压缩空气储能电站，如 Huntorf 电站和 McIntosh 电站，这些项目的成功运行为技术发展提供了宝贵经验。
- **产业生态与基础设施：**美国建立了完善的储能产业链，从设备制造、项目开发到运营维护等各个环节均有成熟的企业参与。此外，美国在基础设施方面也具备优势，如丰富的地下洞穴资源为压缩空气储能提供了天然的储气条件。这些产业生态和基础设施的完善，为压缩空气储能技术的规模化和商业化提供了坚实的基础。

在中国，随着国家对清洁能源发展和电力调峰需求的加大，压缩空气储能项目的建设正在加速推进。已投入运营的项目大多分布在风能和太阳能资源丰富的地区，用于支持大规模可再生能源并网和调节电网负荷。

截至 2023 年底，中国已投运的压缩空气储能项目共 7 个，累计装机容量约 182MW。国内压缩空气储能项目已签约或开工建设项目 25 个，累计储能装机规模达到 8797MW，其中大部分项目预计将在 2027 年前完成投运。预计到 2027 年，中国投运的压缩空气储能累计装机容量将达到 5.8GW/23.2GWh。这意味着，从 2023 年到 2027 年，中国压缩空气储能的年复合增长率接近 200%。

中储国能作为压缩空气储能行业的领头羊，其核心技术源自中国科学院工程热物理研究所。中储国能已经建成了国际首套先进压缩空气储能项目，即张家口 100MW/400MWh 国家示范项目，张家口项目每年可发电 1.3 亿 KWh 以上，是世界上单机规模最大的新型压缩空气储能电站。

除了中储国能，中国也已经形成了一系列重点的压缩空气储能企业，包括中国能建、中国华能、陕鼓

动力、杭氧股份、金通灵、东方电气、雪天盐业等。这些企业在产业链的不同环节发挥作用，包括装备制造、系统集成、项目开发建设以及市场服务等。

我国比较知名的压缩空气储能项目包括：

- 江苏金坛盐穴压缩空气储能国家试验示范项目：2021 年 9 月，江苏金坛盐穴压缩空气储能国家示范项目并网试验成功，该项目由中盐集团控股、华能和清华控股公司参股建设，一期工程为 60MW 的发电装机；作为世界首座非补燃压缩空气储能电站，该项目的成功并网试验标志着压缩空气储能技术的新突破。2022 年 5 月 26 日，江苏金坛盐穴压缩空气储能电站正式投产。
- 山东泰安肥城 10MW 压缩空气储能电站：2021 年 9 月，山东泰安肥城 10MW 压缩空气储能电站成功并网发电，这是国际首套盐穴先进压缩空气储能国家示范电站，利用地下盐穴储气，实现电网削峰填谷。
- 山东泰安 350MW 盐穴压缩空气储能项目：2022 年 9 月，也被称作山东泰安 2×300MW 级压缩空气储能创新示范工程，是一个具有全球领先水平的大规模储能项目；在压缩空气储能领域实现单机功率全球第一、转换效率全球第一、储能规模全球第一，有助于推动新型储能技术高端发展，促进可再生能源大规模并网消纳和废弃盐穴资源再利用。

第五节 中储国能的压缩空气储能

中储国能（北京）技术有限公司成立于 2018 年，是中国科学院工程热物理研究所百兆瓦级先进压缩空气储能技术的产业化公司，先进压缩空气储能系统的开拓者和引领者。

中国科学院工程热物理研究所是我国最早从事大规模压缩空气储能技术研发的机构，先后研制并建成了国际首套 1.5MW 先进蓄热式压缩空气储能示范系统、10MW 先进压缩空气储能国家示范系统和 10MW 盐穴先进压缩空气储能国家示范电站，系统性能指标优于同等规模的压缩空气储能系统。

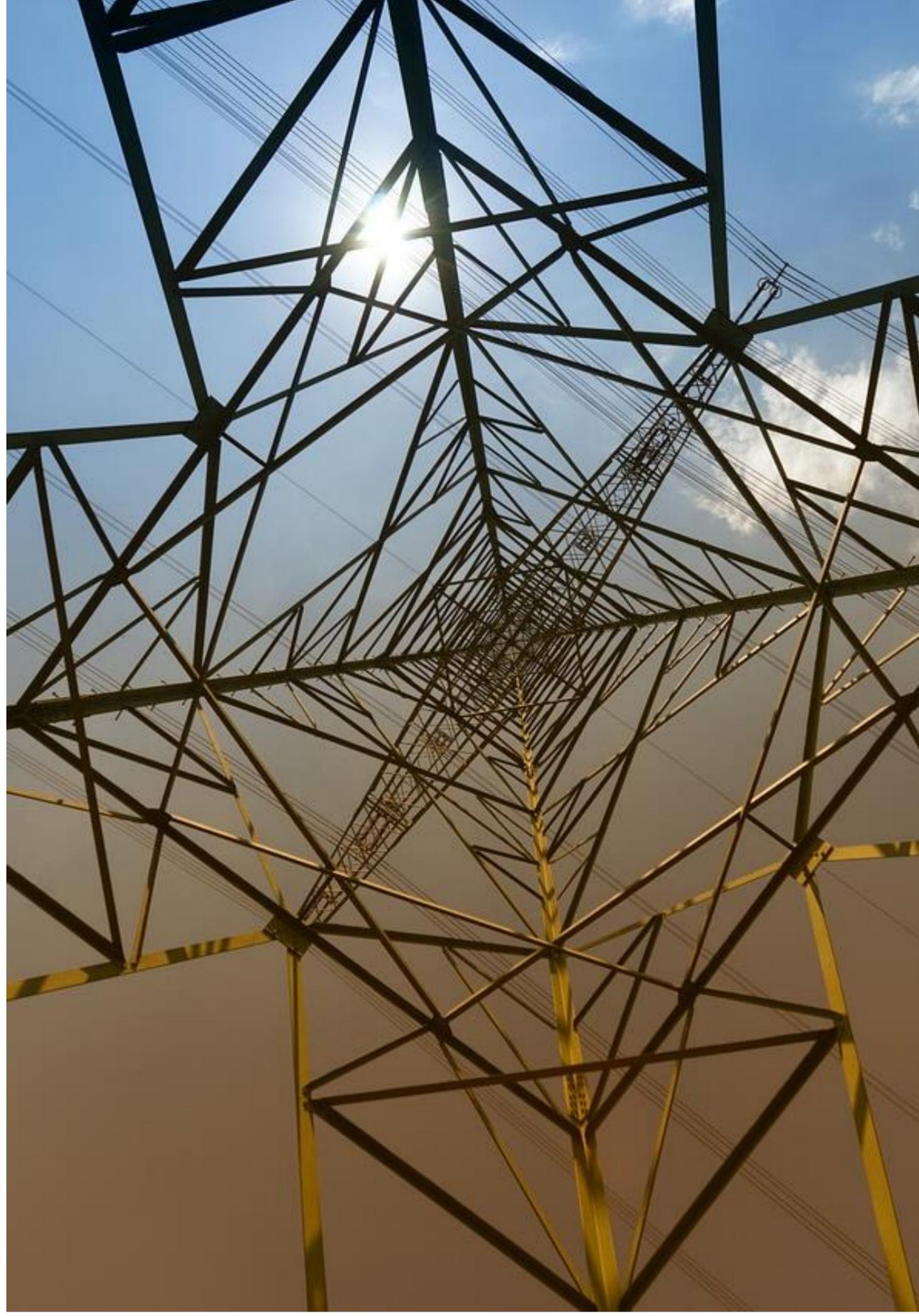
中储国能在此基础上，积极响应国家关于“加大百兆瓦级压缩空气储能等技术研发力度，积极探索商业化发展模式，逐步降低储能成本，开展规模化储能试点示范”的号召，加快新型储能技术产业布局。分别于 2022 年 9 月完成了在张北的 100MW/400MWh 先进压缩空气储能国家示范电站的并网发电，2024 年 4 月完成了山东肥城的 300MW/1800MWh 先进压缩空气储能国家示范电站的并网发电。

山东肥城的 300MW/1800MWh 先进压缩空气储能国家示范电站，有如下几个特点。首先该项目是目前国际上规模最大的压缩空气储能电站，其建设规模为 300MW/1800MWh；其次肥城项目采用了中国科

学院工程热物理研究所自主研发的最先进压缩空气储能技术，该技术具有完全自主知识产权，突破了 300MW 级压缩空气储能系统全套核心关键技术。肥城项目的系统额定设计效率高达 72%，在同类电站中处于领先地位。项目的系统装备自主化率达到 100%，实现了完全自主可控，这在国内乃至国际压缩空气储能领域都是极为罕见的。

同时该项目可实现连续放电 6 小时，年发电量约 6 亿度，为周边居民提供了稳定可靠的电力保障，是年发电量最高的电站。该项目的节能减排效益最显著，电站每年可节约标准煤约 19 万吨，减少二氧化碳排放约 49 万吨，对于推动绿色低碳发展、实现“双碳”目标具有重要意义。

从建设速度及成本上看，该项目的并网发电速度最快，从电站的建设到首次并网发电，整个过程高效有序，体现了我国在压缩空气储能领域的技术实力和建设速度。电站充分利用了山东省肥城市丰富的地下盐穴的地质特点，即地质稳定、埋深适中、气密性好等特点，将盐穴资源作为储气场所，降低了建设成本近 30%，提高了储能效率。肥城项目把巨型盐穴这样的“包袱”，变成了和岩盐资源一样是源源不断的“财富”。



A close-up photograph of a flywheel, a component used for energy storage in mechanical systems. The flywheel is a large, circular metal disc with a gear-like outer edge. In the center, there is a brass contact pad with two electrical terminals. The surface is polished and shows various fasteners, including screws and bolts. The text "第四章 飞轮储能" is overlaid on the image.

第四章 飞轮储能

飞轮储能是一种先进的储能技术，基本原理是将电能转化为飞轮的机械动能进行储存，并在需要时再将机械动能转化为电能释放。具体来说，当飞轮储能系统充电时，电动机带动飞轮加速旋转，将电能转化为飞轮的动能并储存起来；当需要释放能量时，飞轮带动发电机旋转，将动能转化为电能输出。

飞轮储能具有充放电速度快（毫秒级启动）、功率密度高、充放效率高（量转换效率高达 90%）、寿命长（超过 15 年）、无污染、维护成本低、可模块化等优点，但自放电率高，相对能量密度低，一般只能维持几秒到几分钟的放电。

单个飞轮储能装置的容量相对较小，一般在兆瓦级以下，较适合于分布式储能和对功率响应要求高的场景，用于短时间内的功率调节和能量缓冲。

第一节 飞轮储能的基本情况

一、飞轮储能的发展历程

国外飞轮储能技术的发展历程可以追溯到 20 世纪中期，至今已经超过 50 年的研究、开发和应用历史，当时美国、德国和日本等发达国家开始探索并开发这项技术。这意味着在 20 世纪 50 年代，学术界就开始了飞轮储能的研究，但进展缓慢。飞轮储能的发展有以下几个阶段。

在 20 世纪 50 年代，飞轮储能技术的研究开始，但进展较为缓慢。直到 70 至 80 年代，石油危机爆发后，美国开始大力发展能源项目，飞轮储能在欧美等发达国家得到了进一步的发展。

在 20 世纪 90 年代中后期，美国率先进入飞轮储能技术的产业化发展阶段，向不间断供电过渡电源领域提供商业化产品。

飞轮储能技术在 20 世纪 90 年代以后受到了广泛的重视并得到了快速发展，其中美国率先进入飞轮储能技术的产业化发展阶段，将其应用于不间断供电过渡电源领域。与此同时，欧洲的一些国家，如法国和意大利，也在进行高温超导磁悬浮轴承的飞轮储能研究。

飞轮储能技术的商业化应用主要在 20 世纪 90 年代以后逐步发展起来，中国在飞轮储能技术方面起步较晚，从 90 年代开始进行关键技术的基础研究，虽然近年来发展迅速，但是中国的飞轮储能技术仍然落后于欧美国家约 10 年左右。其他国家或地区如加拿大和印度也在积极推动飞轮储能技术的发展。加拿大政府通过制定相关政策和提供资金支持，积极推动飞轮储能技术的研发和应用。印度政府则发布了《2022-2032 年国家电价计划》，介绍了飞轮储能系统的特点，并鼓励通过竞争性招标的方式采购电池储能系统。

中国在飞轮储能领域的政策支持主要体现在国家“十四五”规划的指导下，通过资金补贴、示范项目、市场机制建设以及地方政策的配合，推动飞轮储能技术的研发和规模化应用。这些政策不仅促进了飞轮储能技术的发展，也为实现绿色低碳目标提供了重要支撑。从整体发展历程来看，飞轮储能技术经历了从基础研究到工程示范，再到商业化的过渡阶段。尽管目前全球飞轮储能市场仍处于商业化早期阶段，但其市场规模正在逐步扩大。

飞轮储能技术在多个领域得到了应用，包括 F1 赛车能量回收、轨道牵引能量回收、微电网调压及并网等。飞轮储能装置通常安装在牵引变电所内，当 F1 赛车制动时，飞轮储能系统将制动能量转化为飞轮的高速旋转储存起来，然后在需要加速时释放这些能量，作为辅助动力使用。这种系统可以显著提高赛车的性能和燃油效率。当列车制动时，飞轮储能系统吸收多余的再生制动能量，从而抑制牵引网电压的波动。在列车启动时，飞轮释放储存的能量，帮助列车加速，实现节能和稳定网压的目的。这种技术不仅提高了能源利用效率，还减少了运营成本，并提升了列车运行的安全性。随着技术进步和成本的快速下降，飞轮储能的应用前景被看好，尤其是在高端医疗、高端制造业、大型数据中心和电源车等领域。

我国灵武市的飞轮储能示范项目成功入选国家新型储能试点示范项目，该项目由国家能源局公布，并成功入选新型储能试点示范项目名单，采用磁悬浮飞轮储能系统，并与热电联产技术耦合。这一系统的核心技术达到了国际领先水平，具有 15 分钟的充放电能力，有效支持大电网的安全稳定运行，该项目还被认定为国内首个全容量“飞轮储能+火电联合调频”工程，也是全球单体功率最大、总储能最多的工程项目，展示了飞轮储能系统在提供电力辅助服务和支撑大电网安全稳定运行方面的潜力。

类似地，中车芮城飞轮储能项目是中国中车首个飞轮储能建设项目，该项目将推动飞轮储能技术的示范应用和技术创新，也是贯彻落实“十四五”新型储能发展国家战略的具体举措。

二、飞轮储能的优点

- 高功率密度和高效率：可以在短时间内输出大量能量，适合用于需要快速响应和大功率需求的场景，比如电磁炮的发射和车辆的快速启动。
- 长寿命和高可靠性：在整个寿命周期内，不会因为过充电或过度放电而影响储能密度和使用寿命，而且飞轮也不会受到损害。其寿命主要取决于飞轮电池中电子元器件的寿命，可长达 15 年以上。
- 快速响应和环境友好：充电时间短，一般几分钟内就可以将电量充满，飞轮储能技术能用于电网调频，同时还适合用于轨道交通能量回馈以及不间断电源（UPS）等应用场景。由于采用物理方法进行储能，飞轮储能技术还具备环境友好的优势，没有化学反应产生的污染问题[]。

三、飞轮储能的缺点

- 成本高：尽管飞轮储能技术具有许多优势，但其制造和维护成本较高，限制了其在一些领域的广泛应用。
- 放电时间短：飞轮储能系统的放电时间较短，这使其不适合作为长期的能量储存解决方案，只能用于短期能量储存。
- 无法小型化：飞轮储能系统由于其物理结构限制，难以实现小型化，这在某些应用场景中可能是一个问题。
- 自放电现象：飞轮储能系统存在自放电现象，即在不使用的情况下也会逐渐失去存储的能量，这影响了其作为能量型应用的效率。
- 危险性：高速旋转的飞轮存在一定的危险性，特别是在超过抗拉强度极限值时可能会发生破裂。

四、飞轮储能的应用场景

飞轮储能技术广泛应用于多个领域，包括交通（如混合动力汽车）、供电（如电网调频）、军工、航空航天等。此外，它还可以用于可再生能源的集成和电网稳定。

- 电网调频：飞轮储能系统能够在电网中提供快速的频率调节服务，帮助维持电网的稳定性。它们可以在几秒内响应电网需求变化，吸收或释放能量，以平衡供需。
- 不间断电源（UPS）：在数据中心、医院、通信基站等对电力供应稳定性要求极高的场合，飞轮储能可以作为 UPS 的一部分，提供短时间的电力支持，保障关键设备在电力中断时能够持续运行。
- 轨道交通：飞轮储能可以回收地铁或轻轨列车制动时产生的能量，减少能量浪费，并在列车启动时提供额外的动力支持。
- 电动汽车充电站：飞轮储能系统可以在电动汽车充电站中用于调节电网负荷，提高充电效率和电网稳定性。

图 13：飞轮储能技术的应用场景



来源：36 氪

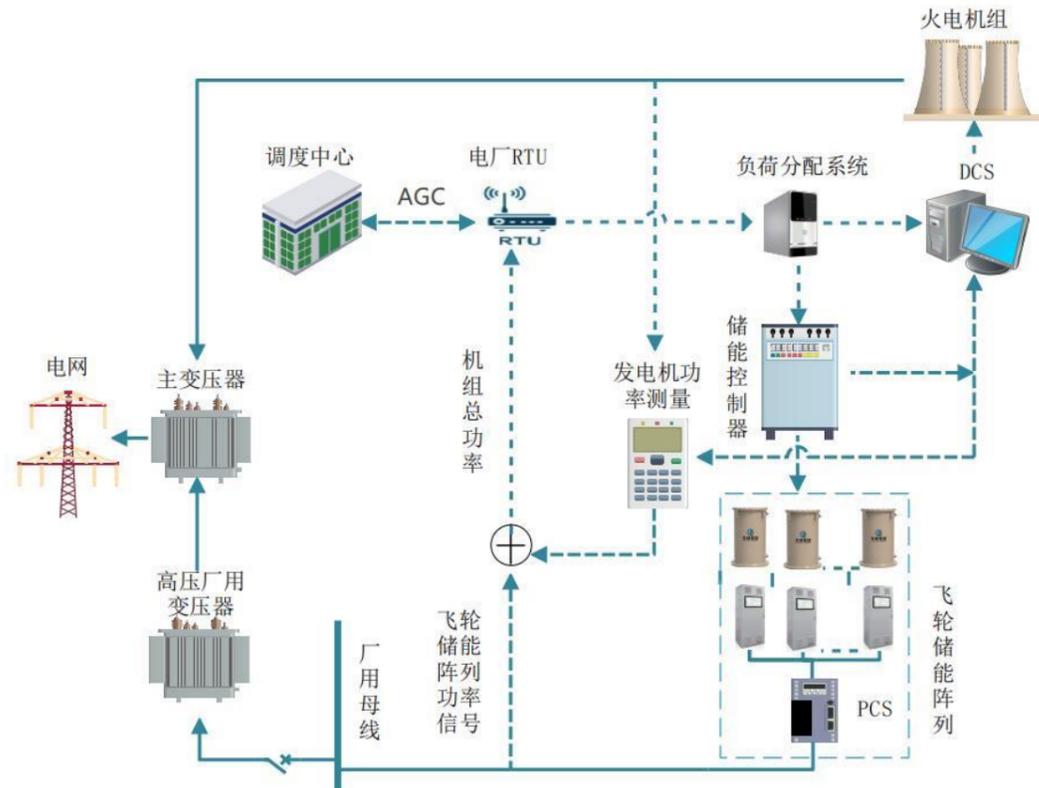
1. 交通

飞轮储能功率密度高、效率高的优点与混合动力汽车契合。比如沃尔沃 S60 T5 车型，采用 60,000 rpm 飞轮，当电力系统有富余时，如在制动或减速过程中，电动机将电能转化为飞轮的动能，这一过程是通过电动机驱动飞轮加速转动实现的，飞轮以高速旋转的形式储存能量；当混合动力汽车需要额外动力时，如加速或爬坡，飞轮会减速并将其储存的机械能（动能）转换回电能，这一过程是通过发电机实现的，飞轮的旋转带动发电机产生电力，供汽车使用。最终使得 S60 T5 车型从静止加速至时速 100 公里的时间为 5.5 秒，比未搭载飞轮系统的标准车型（6.6 秒）快了 1.1 秒，飞轮能量回收系统可以降低燃油消耗 25%。

2. 供电

飞轮储能功率大、响应速度快、寿命长，适用于电网调峰调频。比如，国家电投集团河南省平顶山市叶县长丰风电场采用的是 1000kW/35kWh 的飞轮储能系统，是我国首座电网级飞轮储能调频电站。在用电低谷期，飞轮储能系统的电力电子设备将电网提供的电能用于驱动电动机工作，同时使其带动高速旋转的飞轮，实现电能转化为机械能的储能过程；在用电高峰期或需要频率调节时，高速旋转的飞轮能够带动发电机旋转，通过电力电子设备将电能进行整流和调频等变化后再稳定地向外输出，从而实现机械能转化为电能的输出能量过程。最终让电网的频率处于相对稳定的状态。

图 14: 飞轮储能应用于电网的示意图



来源: 奇峰聚能《电网调频》

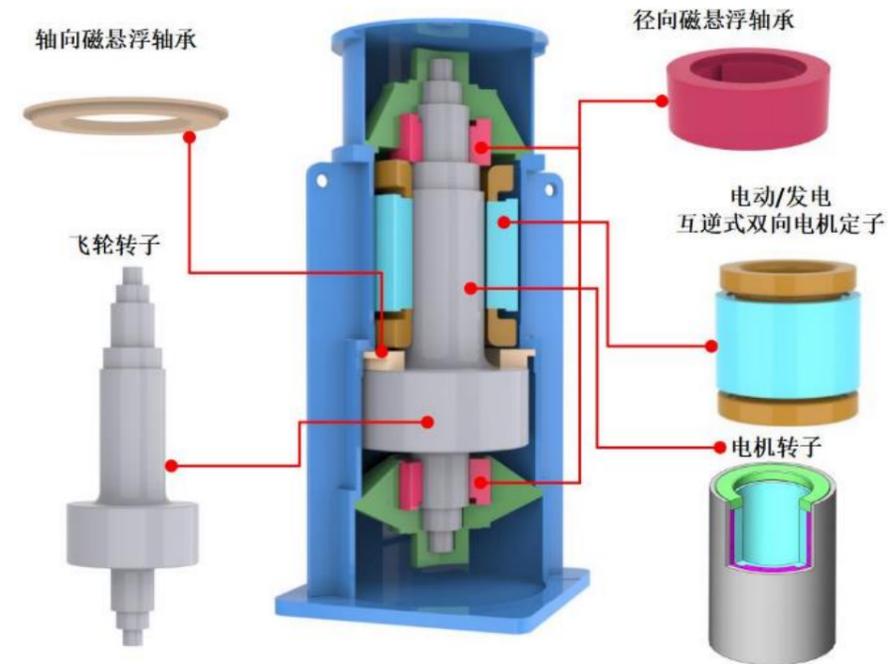
相比抽水蓄能和压缩空气储能,飞轮储能对地理条件基本没有特殊要求,可根据需求灵活布置在各种场所。飞轮储能在分布式储能、对电能质量要求高的场所和需要快速功率调节的领域具有独特的市场定位,与其他储能方式形成补充。

第二节 飞轮储能的产业链

飞轮储能系统基于电动/发电互逆式双向电机,实现电能与高速旋转飞轮的机械动能之间的相互转换与储存。

飞轮储能系统主要的组成部分包括:飞轮转子、真空室、磁悬浮轴承、电力转换器和电动机/电机等。在储能过程中,外界电能通过电力转换器变换后驱动电机运行,电机带动飞轮转子加速旋转,直至达到设定的某一转速(充电时,转速提高)。在这个过程中,飞轮以动能的形式把电能储存起来。当需要释放能量时,飞轮则会减速并带动发电机运转,将旋转动能再次转化为电能(放电时,转速降低)。

图 15: 飞轮储能的系统结构图



来源: 磁悬浮储能飞轮基本结构及充放电原理

第三节 飞轮储能的发展情况

国内和国外飞轮储能的发展具有一定的可比性,但同时也存在显著差异。

技术发展方面,国外飞轮储能技术较为成熟,美国、欧洲和日本是全球飞轮储能技术开发和研究的主要集中地,美国在飞轮储能技术研究方面居于全球领先地位。中国虽然近年来在飞轮储能技术上取得了突破,但总体技术水平和硬件设施仍需进一步提升。

应用领域方面,国外飞轮储能技术主要集中在电网级应用和电力调频等领域。中国则在新能源储能调频领域开始应用飞轮储能技术,并且在一些项目中取得了进展。

尽管国内外飞轮储能市场都在发展,但中国在技术积累、市场规模和应用领域等方面与发达国家相比仍有差距。

1. 国外主要的飞轮储能企业

- 美国 Vycon Inc.，主要业务在 UPS 领域，产品用于数据中心、医院、工业等领域作为电力备用。Vycon Inc.为洛杉矶地铁红线西湖/麦克阿瑟公园站的牵引变电站提供了基于飞轮物理储能技术的储能变电站（WESS）项目。最初部署了 2MW 的系统，具有 15 秒的充电/时间及 8.33kWh 的容量。地铁列车进站时，该系统回收电能，在列车出站时释放电能，起到节能作用并对电网友好。自 2014 年 8 月安装完成后一直处于稳定的运行状态，每天能节省 10%至 18%的牵引电力能源，有助于地铁系统减少能源消耗、降低运营成本，同时减少了地铁制动能量对电网的冲击，对于城市轨道交通的节能减排和可持续发展具有重要意义。
- 美国 Amber Kinetics Inc.专注于飞轮储能技术的研发和应用，主要生产长时飞轮能量存储系统，其产品能够将飞轮的能量存储时间从几分钟延长到几小时，提供安全、可持续、可靠、高效、简单和灵活的能源存储解决方案，在多个领域展示了其技术和市场地位，特别是在高海拔和恶劣气候条件下，Amber Kinetics 的飞轮储能系统能为其提供能源解决方案。
- 美国 Active Power 提供用于电力备用的飞轮储能产品，主要应用于数据中心、医院、工业等。
- 加拿大 Temporal Power 专注于飞轮储能技术的研发和应用，其产品电力系统、备用电源、交通工具等领域有广泛应用。
- 美国 Energy Nest，飞轮储能系统被广泛应用于电力、通信和基础设施等领域。
- 德国 Flybt 能源解决方案有限公司，专注于研发和生产高性能飞轮储能系统，产品具有高效、可靠和安全等特点。

2. 国内主要的飞轮储能企业

国内飞轮储能行业虽然起步较晚，但发展迅速，特别是在国家政策的鼓励和支持下，越来越多的企业开始投入到飞轮储能技术的研发和应用中。随着技术的成熟和成本的降低，预计飞轮储能将在未来的能源存储市场中扮演更加重要的角色。

国内早期从事飞轮储能技术研发的单位例如北京飞轮储能（柔性）研究所、核工业理化工程研究院、中科院电工研究所、清华大学、华北电力大学、北京航空航天大学等。

国内从事飞轮储能系统的实际应用开发的企业包括沈阳微控、华阳股份、泓慧国际能源、微控能源、国机重装、广大特材、苏交科、湘电股份等。

- 微控飞轮：中国唯一一家批量化生产高速磁悬浮飞轮储能装备制造的企业，也是全球技术领先的飞轮储能系统制造商。
- 坎德拉（深圳）新能源科技有限公司：定位为磁悬浮飞轮储能技术的核心供应商和系统集成商，是坎德拉集团旗下的核心公司。截至 2023 年底，坎德拉新能源是国内新能源领域飞轮储能系统已装机数量最多、装机功率最高的企业。
- 华驰动能：电力级全磁悬浮储能飞轮企业，其创始人和核心技术曾荣获国家技术发明一等奖。
- 上海复旦微电子集团股份有限公司：飞轮储能研发团队拥有多年的研发经验和技術积累，其飞轮储能系统已经在国内多个项目中得到应用。

3. 沈阳微控的产品

该公司专注于磁悬浮飞轮储能技术的研发和产业化，其产品利用高速旋转的转子进行物理储能，最高转速可达每分钟 41000 转。

在国内因其自主研发了国际领先的磁悬浮飞轮储能产品，建立了全国唯一量产的磁悬浮储能飞轮产线，成为中国唯一一家批量化生产高速磁悬浮飞轮储能装备制造企业，也是全球技术领先的飞轮储能系统制造商；在国际上通过并购美国 VYCON 公司，掌握了全球领先的飞轮储能技术资源，并且其产品在全球范围内有广泛的应用和部署，其主要研发方向包括完成十兆瓦乃至百兆瓦级别飞轮储能系统的规模化部署应用，在电力新能源调频、不间断电源关键电力保障、城市轨道交通等领域发挥着重要作用。

- 在电力新能源调频方面，沈阳微控的飞轮储能系统能够提供快速响应的电网频率调节服务。这种系统利用高速旋转的飞轮来储存动能，一旦检测到电网频率的波动，飞轮能够迅速释放或吸收能量，以维持电网的频率稳定。其飞轮储能系统能够在短时间内快速响应电网调频需求，提高电网的稳定性和可靠性。
- 在不间断电源关键电力保障领域，沈阳微控的飞轮 UPS 系统为数据中心、医疗设施、工业生产等关键领域提供了高可靠性的电力保障。与传统的铅酸蓄电池相比，飞轮储能系统具有更长的使用寿命和更高的安全性，能够在电力中断时立即提供应急电源，确保关键操作的连续性。

- 在城市轨道交通领域，飞轮储能系统可以回收地铁制动时产生的能量，并在列车启动时提供额外的动力，这不仅提高了能源的利用效率，还减少了对电网的冲击。此外，飞轮储能系统还可以作为紧急备用电源，保障地铁系统在突发情况下的可靠运行。

图 16：沈阳微控的磁悬浮飞轮储能产品



来源：《磁悬浮飞轮储能产品国际领先!》

具体项目：

- 兆瓦级飞轮储能系统：沈阳微控与中核集团、三峡集团联合研制的“适用于新能源电站惯量和调频支撑的兆瓦级飞轮储能系统”成功入选国家能源局能源领域 2021 年度首台重大技术装备目录，是电力调频领域唯一入选的重大技术装备。兆瓦级飞轮储能系统由于大功率、响应快、高频次场景的优点使得其可以应用于轨道交通、电网调频、不间断电源、充电桩、石油开采、数据中心、工业、微电网实验平台、应急指挥中心和国防等多个领域中。

其中比较典型的的就是邯长铁路是国内首次将兆瓦级飞轮储能系统应用于电气化铁路领域的案例；青岛地铁 3 号线兆瓦级飞轮储能的并网应用，是国内首次实现了兆瓦级飞轮储能系统在电力系统频率调节中的应用，实现全国最大规模的飞轮储能/混合储能调频电站。

- 磁悬浮飞轮产线：2024 年 4 月，沈阳微控投资建设了沈阳中德园交能融合零碳产业园暨沈阳微控磁悬浮应用产业基地项目，将新建磁悬浮飞轮产线和高速磁悬浮电机产线，重点开发和生产主动磁悬浮飞轮储能技术和产品。

磁悬浮飞轮特别是在电力调频、不间断电源、轨道交通和电动汽车快速充电等方面具有显著的优势和应用潜力。例如为不间断电源提供稳定可靠的能源、卫星储能电池、综合动力和姿态控制等。

- 高速永磁同步电机和五自由度主动磁悬浮轴承：，沈阳微控掌握了全球领先的高速磁悬浮储能飞轮完整技术体系，包括高速永磁同步电机、五自由度主动磁悬浮轴承等多项核心技术，并拥有完全自主知识产权。

高速永磁同步电机因其高效率、高功率密度和快速响应的特点，被广泛应用于工业自动化、机器人、电动汽车、风力发电、船舶推进等领域。在工业自动化中，永磁同步电机能够提供高速、高精度的动力完成各种任务；在电动汽车领域其高功率密度和高效率让电动汽车具有更好的续航能力和节能效果。

五自由度主动磁悬浮轴承提高了飞轮储能系统的效率，还减少了机械磨损，延长了设备的使用寿命，使得飞轮达到每分钟 41000 转的旋转速度；

五自由度主动磁悬浮轴承可以应用于余热发电机中，这种轴承体系能够提供高精度的控制，确保转子在五个自由度上完成支承，从而提高系统的整体性能和稳定性。

- 飞轮储能系统 PCS-IPM 一体机：针对现阶段飞轮电机控制存在的诸多难题，如采样噪声与发波延迟造成的飞轮稳定性变差、动态响应变慢等，沈阳微控开发出适用于飞轮储能系统的 PCS-IPM 一体机，实现了适应飞轮储能负荷特点的电机控制算法、IGBT 驱动方案及最小电感组件设计，并应用于实际产品。

第五章 重力储能

重力储能系统利用电能将重物（例如大型混凝土块或岩石）提升到高处。当电力需求增加时，重物在重力作用下下落，通过机械传动系统驱动发电机产生电力。

- 长寿命：由于重力储能系统的机械部件相对简单，其使用寿命长，且维护成本较低。
- 灵活应用：重力储能能够根据不同地理条件进行调整，特别适合在地质条件复杂的地区应用。
- 经济性：尽管初期投资较高，但重力储能系统的运营成本较低，适合长期的能源储备和应用。

在全球范围内，重力储能技术逐渐成为一种重要的能源储备方式，特别是在中国，重力储能的部署正在迅速扩展。以 Energy Vault 为代表的企业通过与中国本地公司合作，推动了多个重力储能项目的落地。这些项目通常采用模块化设计，以适应中国各地复杂的地形和资源条件，并利用本地材料构建储能设施，从而降低成本和环境影响。

Energy Vault 在瑞士开发的重力储能塔项目是重力储能技术的一个标志性实例。该项目通过利用起重机将大型混凝土块提升到高处储能，当需要释放能量时，这些块体被逐渐降低，通过机械系统将势能转化为电能，从而驱动发电设备发电。这个重力储能塔的设计具有高度的模块化和灵活性，可以根据不同的地理条件和能源需求进行定制。

Energy Vault 的解决方案特别适合那些地形复杂、无法进行传统储能技术部署的地区。与抽水蓄能不同，重力储能塔不依赖于水资源，这使得其适用范围更广，特别是在干旱或缺水的地区。这个项目展示了重力储能在资源有限地区的应用潜力，特别是在不适合传统储能技术的环境中，为未来全球能源市场提供了一种创新且环保的储能解决方案。

重力储能技术逐渐成为能源储备的重要组成部分，尤其在偏远地区或地质条件特殊的区域，重力储能展现出了广阔的应用前景。随着国家对可再生能源调峰需求的持续增加，预计到 2030 年，重力储能项目的建设将大幅提速，其总装机容量有望实现显著增长，助力能源结构的优化和电网的稳定运行。中国电建等企业在这一领域具有重要地位，利用其在大型基础设施建设中的经验和技術优势，推动了重力储能项目的快速发展。

参考文献

1. 《2024 中国新型储能行业发展白皮书》
2. 《2023 年压缩空气储能行业研究报告》
3. 《2023 年中国储能行业研究报告》
4. 《深圳抽水蓄能电站环境保护措施及实施效果》
5. 《2024-2030 全球与中国飞轮储能 (Fes) 市场现状及未来发展趋势》
6. 【干货】抽水蓄能电站机电设备简介, OFweek 电力网
7. 储能电站物理储能技术工作原理, 智能电力网
8. 关于国内外储能行业技术与形势的调查报告, 哔哩哔哩
9. 国外新型储能产业政策发展动态及对我国的启示
10. 2024 年全球工程机械用储能 BMS 行业前景分析及投资可行性研究报告, 格隆汇
11. 多国加快新型储能技术发展 (国际视点), 新浪网
12. 储能行业发展历程 | 储能产业专题 (上), 腾讯
13. 2024 年中国储能行业研究报告, 21 经济网
14. 中国机械储能行业: 技术创新有望提升效率和经济性
15. 一文梳理全球及中国储能技术类别及发展历程 (多图), 百度
16. 全球工程机械行业发展概况, 百度
17. 全球机械行业发展历程, 百度文库
18. 我国工程机械行业发展概况, 百度
19. 中国现代机械工业, 百度百科
20. 磁悬浮储能飞轮基本结构及充放电原理, 奇峰聚能
21. 飞轮储能系统的核心及优势分析, 充电桩网



INTRODUCTION



关于上海现代服务业联合会

上海现代服务业联合会，是由本市主要从事服务业的行业协会、学会、商会等社会组织及企事业单位自愿组成的跨行业、跨领域的综合性枢纽型非营利社团组织。拥有会员单位1500余家，其中200余家为行业协会、学会、商会等社会组织，覆盖了金融、信息、科技、商务、生产、公共、专业服务等多个领域，基本囊括上海市服务业的所有行业。

以联合会为主发起设立了上海现代服务业企业促进中心、上海经贸商事调解中心、上海现代服务业发展研究院、上海现代服务业发展基金会、上海现代服务业标准创新发展中心等五个民非实体机构，并牵头成立长三角现代服务业联盟，具有全面服务社会、助推经济发展的综合实力和核心竞争力。

2024年3月，上海市商务委关于印发《加快提升本市涉外企业环境、社会和治理（ESG）能力三年行动方案（2024-2026年）》，明确上海现代服务业联合会承担着“加大对ESG理念的宣传力度”的主要任务。



关于荣续ESG智库研究中心

荣续ESG智库研究中心，致力于推动“绿色共赢”的可持续发展理念，成为企业ESG发展的长期伙伴。我们通过ESG行业研究、优秀案例研究、政策和标准研究、热点和趋势分析等，解决气候变化、环境、社会、公司治理等领域的信息缺乏或信息不对称的问题，为企业提供可落地、可复制、可持续的ESG 解决方案，帮助企业践行ESG理念，创造长期价值。

荣续智库研究中心汇聚了各行业的ESG专家和研究员，他们在各自领域拥有丰富经验和卓越能力。这些专家大部分是来自品职教育的ESG持证学员。品职教育拥有超过百万的活跃ESG学习社群，以及超过3万名ESG人才组成的人才库，是荣续智库坚实的人才资源。

荣续智库将继续发挥行业经验，秉持深刻洞察力和强大执行力，帮助企业将ESG有效整合到核心战略中，助力企业在ESG领域实现突破，创造社会和经济双重价值。

ESG白皮书系列

- | | | | | |
|-------------------|--------------------|--------------------|------------------|--|
| 01 纺织服装行业ESG白皮书 | 13 包装印刷行业ESG案例白皮书 | 25 银行绿色金融行业ESG白皮书 | 37 酒旅行业ESG白皮书 | 49 基建行业ESG白皮书 |
| 02 食品饮料行业ESG白皮书 | 14 家电行业ESG白皮书 | 26 跨境电商行业ESG白皮书 | 38 零碳产城融合项目发展白皮书 | 50 气候金融ESG白皮书（基础篇） |
| 03 汽车行业ESG白皮书 | 15 美妆行业ESG白皮书 | 27 光储充行业ESG白皮书 | 39 零碳产城融合项目案例白皮书 | 51 气候金融ESG白皮书（实务篇） |
| 04 化工行业ESG白皮书 | 16 钢铁行业ESG白皮书 | 28 电子元器件分销行业ESG白皮书 | 40 白酒行业ESG白皮书 | 52 新能源汽车行业ESG白皮书（电池类） |
| 05 环保行业ESG白皮书 | 17 物流及航运物流行业ESG白皮书 | 29 建筑材料行业ESG白皮书 | 41 电力行业ESG白皮书 | 53 新能源汽车行业案例白皮书（电池类） |
| 06 新能源行业ESG白皮书 | 18 航空物流行业ESG白皮书 | 30 通信服务行业ESG白皮书 | 42 物业行业ESG白皮书 | 54 新能源汽车行业ESG白皮书（氢能·
甲醇·生物质·天然气·太阳能类） |
| 07 半导体行业ESG白皮书 | 19 建筑行业ESG白皮书 | 31 通信设备行业ESG白皮书 | 43 有色金属行业ESG白皮书 | 55 医养康行业ESG白皮书 |
| 08 医药行业ESG白皮书 | 20 储能行业ESG白皮书 | 32 家居装饰行业ESG白皮书 | 44 零碳物流园区发展白皮书 | 56 公共建筑行业ESG白皮书 |
| 09 财会行业ESG白皮书 | 21 机械储能行业ESG白皮书 | 33 互联网教育行业ESG白皮书 | 45 零碳园区发展白皮书 | 57 智能制造行业ESG白皮书（航空航天） |
| 10 金融“一带一路”ESG白皮书 | 22 电化学储能行业ESG白皮书 | 34 医疗器械行业ESG白皮书 | 46 传媒行业ESG白皮书 | 58 微电网与虚拟电厂行业ESG白皮书 |
| 11 包装行业ESG白皮书 | 23 化学储能行业ESG白皮书 | 35 医疗卫生行业ESG白皮书 | 47 造纸行业ESG白皮书 | 59 中国企业出海ESG白皮书（更新版） |
| 12 印刷行业ESG白皮书 | 24 出海欧盟 行业ESG白皮书 | 36 康复辅具行业ESG白皮书 | 48 煤炭行业ESG白皮书 | 60 零碳园区案例白皮书（系列） |

合作咨询请联系
(扫码添加联系人)



欢迎关注荣续ESG智库研究中心
为您提供最新的ESG资讯
共同探索可持续发展的未来

