DOI: 10.19666/j.rlfd.202605080

新型重力压缩空气储能系统热力学及经济性研究

文军[1]，胡亚安[2]，赵瀚辰[3]，张学林[4]，倪尉翔[2]，李阳[3]

1．华能核能技术研究院有限公司，上海 200131；2．南京水利科学研究院，南京 210029；3．西安热工研究院有限公司，西安 710043；4．清华大学电机工程与应用电子技术系，北京 100084

［摘　　要］本文提出一种基于重力恒压的新型压缩空气储能系统，通过热能、压力势能和重力势能的存储，可实现高效稳压储释能运行。结合建模仿真与理论分析，开展了系统储能机理和能量、㶲存储特性研究；进一步开展了重力恒压储气库缩比试验研究，以验证重力恒压动态稳压能力。根据理论分析，系统能量存储以压缩热能为主，㶲存储则以压力势能为主，重力势能占比均不足 1%；系统储能效率最高可达 68.33%，在蓄热温度一致时，整体优于传统恒容压缩空气储能系统；在发电容量一致时，该系统所需储气容积也低于传统恒容压缩空气储能系统，储气容积最大可减少 91.07%。根据试验研究，重力恒压储气库在进、排气流量波动条件下实现稳定压力输出，但实际应用需考虑重力恒压机构摩擦引起的压力损失。此外，经济性分析也表明该系统具有良好的成本及收益潜力。重力压缩空气储能具备稳压充、放气运行能力，因而可避免压缩及膨胀过程变工况运行、提升系统运行效率，同时降低储气容积需求，为压缩空气储能技术推广应用提供了新的技术路径。

［关　键　词］重力恒压；压缩空气储能；理论分析；试验验证；技术经济性

［引用本文格式］（本段作者勿动）作者姓名．中文标题[J]．热力发电，年，卷(期)：起始页码-终止页码．　作者姓名．英文标题[J]．Thermal Power Generation，年，卷(期)：起始页码-终止页码．

Thermodynamic and Economic Study on a Novel Gravity-based Compressed Air Energy System

Wen Jun[1]，Hu Ya’an[2]，Zhao Hanchen[3]，Zhang Xuelin[4]，Ni Weixiang[2]，Li Yang[3]

1．Huaneng Nuclear Energy Technology Research Institute，Shanghai 200131；2．Nanjing Hydraulic Research Institute，Nanjing 210029；3．Xi’an Thermal Power Research Institute Co.，Ltd.，Xi’an 710043；4．Department of Electrical Engineering，Tsinghua University，Beijing 100084

Abstract: This paper proposes a novel compressed air energy storage (CAES) system that fundamentally integrates gravity to achieve constant-pressure operation. By simultaneously storing thermal energy, pressure potential energy, and gravitational potential energy, this innovative system facilitates highly efficient and stable-pressure energy storage and release performance. To thoroughly understand its performance, the study employs a comprehensive methodology combining mathematical modeling, thermodynamic simulations, and theoretical analysis to investigate the underlying energy storage mechanisms and the specific characteristics of energy and exergy storage. Furthermore, a scaled-down experimental prototype of the gravity-enhanced constant-pressure air reservoir was constructed and tested, successfully verifying its dynamic pressure-stabilizing capabilities under realistic operating conditions. Theoretical analysis yields several critical insights into the system's thermodynamic behavior. It reveals that the system's total energy storage is predominantly in the form of compressed thermal energy, whereas exergy storage is primarily driven by pressure potential energy. Gravitational

收 稿 日 期：XXXX-XX-XX　修 回 日 期：XXXX-XX-XX　接 受 日 期：XXXX-XX-XX　网络首发日期：XXXX-XX-XX
基 金 项 目：中国工程院咨询项目“重力压缩空气储能发展战略研究”(2022-XY-74)；江苏省重力压缩空气储能核心技术研发及产业化人才联合攻关体（Rq125001）；中国华能集团总部科技项目“兆瓦级重力压缩空气储能系统关键设备研制与工程示范（第一阶段）” (HNKJ21-H33)
Supported by：Consulting Project of Chinese Academy of Engineering: Research on Development Strategy of Gravity Compressed Air Energy Storage (2022-XY-74); Jiangsu Joint Research Team for Core Technology R&D and Industrialization of Gravity Compressed Air Energy Storage (Rq125001); Headquarters Science and Technology Project of China Huaneng Group: Development and Engineering Demonstration of Key Equipment for Megawatt-scale Gravity Compressed Air Energy Storage System (Phase I) (HNKJ21-H33)
第一作者、通信作者简介：文军（1971），男，硕士，正高级工程师，主要研究方向为储能，wenjun95@163.com。

potential energy accounts for less than 1% in both metrics. Despite this, the system demonstrates exceptional thermodynamic performance, achieving a maximum round-trip efficiency of 68.33%. When compared under identical heat storage temperatures, this novel system consistently outperforms traditional constant-volume CAES systems. Moreover, the constant-pressure feature provides a massive advantage in spatial efficiency. For a given power generation capacity, the required air storage volume is drastically reduced compared to traditional constant-volume systems, with the maximum volume reduction reaching an impressive 91.07%. This significant reduction in reservoir size can substantially lower capital costs and alleviate geographical constraints for large-scale energy storage deployment. Experimental results further validate the system's operational robustness, demonstrating that the gravity-enhanced constant-pressure reservoir can maintain a highly stable pressure output even when subjected to significant fluctuations in inlet and outlet flow rates. However, the study also identifies a practical engineering challenge: real-world applications must carefully account for pressure losses caused by mechanical friction within the gravity-based pressure-regulating mechanism. Additionally, economic analysis indicates that the novel system possesses promising potential in terms of cost and revenue. In conclusion, the gravity-based CAES system offers a compelling solution to the inherent inefficiencies of traditional systems. By maintaining constant pressure during both the charging and discharging phases, it effectively prevents compressors and expanders from operating under off-design conditions. Therefore, the operating efficiency of the compressors and expanders can be maintained at the designed level, leading to round-trip system efficiency improvement. This not only enhances overall system efficiency but also dramatically reduces the required air storage volume. Ultimately, this research provides a novel, highly promising technical pathway for the widespread commercial adoption and scaling of compressed air energy storage technologies in future renewable energy grids.

Key words: gravity-based；compressed air energy storage；theoretical analysis；experimental validation；techno-economic analysis

“双碳”目标下，新型电力系统亟需储能支撑新能源高比例渗透[1]。压缩空气储能（Compressed Air Energy Storage, CAES）具备大容量、长周期特点，拥有同步发电机的强物理惯量支撑能力，是新型储能的重要技术路线。我国 CAES 技术当前呈现蓬勃发展态势，2022 年 5 月，中盐华能金坛 60 MW 非补燃式盐穴 CAES 国家示范项目正式并网运行，我国商业 CAES 电站实现零的突破，至今已常态化商业调度运行超 3 年[2]。截止 2025 年 12 月，我国在建或拟建 CAES 项目已超 100 个，总容量达 80 GWh，单机功率覆盖 MW 至 350 MW 级[3]，推动了关键设备技术成熟和产业链完善。然而，CAES 大规模推广应用仍有关键瓶颈问题亟待突破。

现有 CAES 一般采用盐穴、人工硐室、地面储罐等作为固定容积储气库，系统充放气过程中必须滑压运行[4]，导致压缩机组和膨胀机组偏离高效设计工况[5]；同时，在储气库压力低于透平机最低进气压力时，剩余压缩空气无法继续利用，导致储气装置容积利用率低下、能量密度偏低[6]；此外，盐穴、大规模人工硐室的选址还面临一定地理条件限制[7]。

恒压储气库可摒弃充放气过程的滑压及节流需求[8]，使压缩机组、膨胀机组始终在设计工况下高效运行；存储的压缩空气也可全部得到释放利用，能量密度大幅提高、储气容积大幅减小[9]。因而，恒压 CAES 是当前研究热点之一，国内外恒压 CAES 的理论及实践研究主要集中在水力耦合恒压方向。

针对水下柔性气囊恒压储气库，Pimm 通过有限元分析对顶部进气式气囊结构的流体动力学性能进行了优化设计[10]；Vasel-Be-Hagh 针对水下应用场景提出了一种组合式储气包布局，能够有效应对水流带来的扰动[11]；Mas 设计了一种管状储气袋，可适应海底复杂地形的安装布置[12]；示范项目方面，2015 年，Hydroster 在安大略湖建设了全球首个水下 CAES 项目，设计功率 0.7MW，之后在休伦湖内开展了 2.2MW/10MWh 的放大示范[13]；由于密封性维护、深海压载可靠性等技术瓶颈，水下 CAES 未进一步实现大型电站应用。

Youssef 通过水泵-水轮机组注水或排水，可控制恒容储气库充放气恒压，系统理论效率分别可达 55.1%；该技术可规避水下气囊的技术瓶颈，但水泵-水轮机组与压缩-膨胀机组的动态协同控制难度较大[14]。

综上所述，恒容 CAES 存在系统效率、能量密度和地理适应性等技术挑战，水力耦合恒压 CAES 也面临实用化问题；CAES 大规模推广应用仍需思路创新和探索实践。

2020 年，华能集团提出了图 1 所示重力压块-储气竖井式恒压 CAES 技术概念——利用固体压块

对密封竖井内的空气施加恒定的重力，使其在充放气恒压，从而维持压缩和膨胀过程工况稳定。

重力储气库主要由重力压块、储气竖井及两者之间的密封装置构成，三者密封形成恒压储气室。充气时，压缩机排气压力与压块重力平衡，压缩空气以稳定压力连续注入，推动压块浮升、恒压储气室容积扩大；放气时，压块下降，推动压缩空气以与其重力平衡稳定压力进入膨胀机。理论上，重力压块可下降至与恒压储气室底部接触，从而排出全部存储的压缩空气，存储气体利用率理论上可达100%。

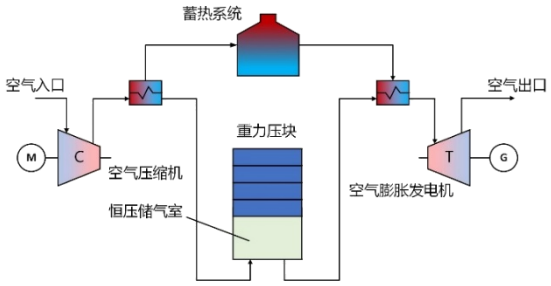


图 1 重力 CAES 原理示意图

Fig.1 Schematic Diagram of Gravity‐ Based CAES Principle

根据技术原理，重力恒压 CAES 可进一步摆脱水源地理限制条件，实现恒压 CAES 在内陆、干旱地区的广域推广应用。华能集团牵头，联合南京水利科学研究院、清华大学等在重力 CAES 研发方面取得了进展，并通过原理试验开展了关键技术、材料、装备验证。本文通过构建热力学模型，分析了重力 CAES 能量存储机理及关键变量优化规律；通过搭建试验平台，验证了重力恒压技术的稳定工况运行能力；参考电力现货市场政策构建成本模型，对 100MW 重力 CAES 进行了初步经济性分析。

1 热力系统及理论分析

基于重力 CAES 技术原理，设计图 2 所示 100MW×4h 系统工艺流程方案。

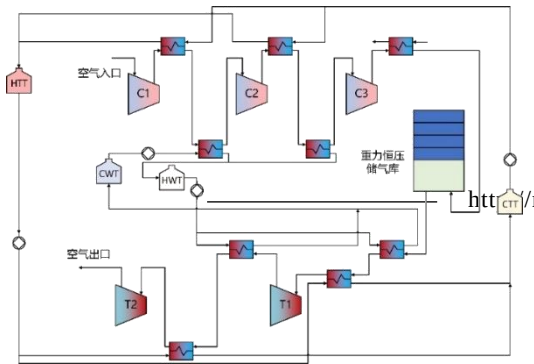


图 2 重力 CAES 统工艺流程图

Fig.2 Process Flow Diagram of Gravity‐ Based CAES System

储能时，系统通过电动机驱动三级串联空气压缩机组（C1-3），将环境空气压缩至高温高压状态，其中热能通过各级压缩机后换热器逐段被低温蓄热介质吸收后储存在高温蓄热罐内，压缩空气则最终输送至重力储气库中存储；在此过程中，储气库中气体连续增加，重力压块在高压空气的推动下逐渐上升至最高位置。

发电时，压块驱动压缩空气先后进入双级串联膨胀发电机组（T1-2）中膨胀降温并做功发电。压缩空气进入各级膨胀机前，首先在级前换热器中与高温蓄热介质换热升温，做功后的空气则最终排入环境。

依据图 2 所示系统工艺构建系统热力学仿真模型，边界参数如表 1 所示。

表 1 系统仿真参数取值

Tab.1 System Simulation Parameter Values

序号	项目	单位	参数
1	膨胀发电功率	MW	100
2	膨胀发电时长	h	4
3	压缩储能时长	h	8
4	辅机电耗比	-	1.0%
5	换热器压损	kPa	100
6	压缩机等熵效率	-	88%
7	膨胀机等熵效率	-	92%
8	压缩机轴效率	-	98%
9	膨胀发电机轴效率	-	99%

本文参考国内现有 CAES 电站，选取加压水作为换热储热媒介，并限制储热温度最高不超过 180℃；同时，设置压缩机 C1-3 各级排气温度相等；此外，设定各换热器中压缩空气与加压水的最小换热温差为 10 ℃。

1.1 储能机理分析

根据重力 CAES 原理，系统输入的电能被分为三部分进行存储：加压水蕴含的热能，存储压缩空气蕴含的内能（压力势能为主），以及压块蕴含的重力势能。

由于恒压充放气过程中储气库内部不发生气体压缩或膨胀，因而可假设重力储气库为恒温模型，则其充气前后过程能量方程应为：

$$\Delta E = \Delta E^{\mathrm{air}} + \Delta E^{\mathrm{grav}} \tag{1}$$

http://rlfd.cbpt.cnki.net

式中，ΔE 为储气库能量变化量，上标 air 和 grav 分别表示压缩空气和压块。本文理论分析聚焦于重力 CAES 的核心热力学机理，未计入机械摩擦损失与密封漏气损失。

储气库总能增量为压缩空气进气含能总量，而压块重力势能则源自进气过程压缩空气的推动功，则上式可进一步展开为：

$$M_{\mathrm{in}}^{\mathrm{air}}c_{\mathrm{p}}^{\mathrm{air}}T_{\mathrm{in}}^{\mathrm{air}}=M_{\mathrm{in}}^{\mathrm{air}}c_{\mathrm{v}}^{\mathrm{air}}T_{\mathrm{in}}^{\mathrm{air}}+p_{\mathrm{in}}^{\mathrm{air}}\Delta V^{\mathrm{air}} \tag{2}$$

或

$$\begin{aligned}M_{\mathrm{in}}^{\mathrm{air}}c_{\mathrm{p}}^{\mathrm{air}}\left(T_{\mathrm{in}}^{\mathrm{air}}-T_0\right)&=M_{\mathrm{in}}^{\mathrm{air}}c_{\mathrm{v}}^{\mathrm{air}}\left(T_{\mathrm{in}}^{\mathrm{air}}-T_0\right)\\&+\varphi_0 p_{\mathrm{in}}^{\mathrm{air}}\Delta V^{\mathrm{air}}\end{aligned} \tag{3}$$

式中，M 为质量，T 为绝对温度，p 为压力，c_p 和 c_v 为定压比热容和定容比热容，T_0 为参考绝对温度，ΔV 为体积变化量；φ_0 为参考温度工况下的重力势能修正系数。

公式（2）转化为公式（3）时，储气库能量变化总量和储气含能总量可直接采用绝对温度差值计算相对焓差，而重力势能项不能直接通过当地温度与参考温度的差值进行修正，因而本文通过定义 φ_0 为修正系数根据理想气体状态方程及公式（2）和（3），重力势能在参考温度下的修正系数为：

$$\varphi_0=\frac{T_{\mathrm{in}}-T_0}{T_{\mathrm{in}}} \tag{4}$$

则系统存储的各部分能量可采用下式计算得出：

$$\begin{cases}\Delta E^{\mathrm{water}}=M_{\mathrm{in}}^{\mathrm{water}}\Delta h_{\mathrm{in}}^{\mathrm{water}}\\ \Delta E^{\mathrm{air}}=M_{\mathrm{in}}^{\mathrm{air}}\Delta h_{\mathrm{in}}^{\mathrm{air}}\\ \Delta E^{\mathrm{grav}}=\varphi_0\rho^{\mathrm{grav}}g\Delta H^{\mathrm{grav}}=\varphi_0 p_{\mathrm{in}}^{\mathrm{air}}\Delta V^{\mathrm{air}}\end{cases} \tag{5}$$

式中，上标 water 表示加压水蓄热介质，Δh_{in} 为相对于参考绝对温度的相对比焓值，ρ 为压块密度，g 为重力常数，ΔH 为压块上升高度。

结合公式（5）及仿真对重力 CAES 系统能量存储状态进行量化分析，如图 3 所示。系统能量的存储以热能为主，且热能存储容量随储气压力上升而增大，这是由于储气压力提升致使压缩机 C1-3 压缩比提升、排气温度上升。同时，压力势能及重力势能的容量相对较小，且由于总储能容量不变，两者均随储气压力的上升逐渐下降。值得注意的是，虽然压力提升，但压力势能下降更为显著，表明储气量在快速减少，这一结论将在图 6 中得到印证。

图 3 系统能量存储容量分配

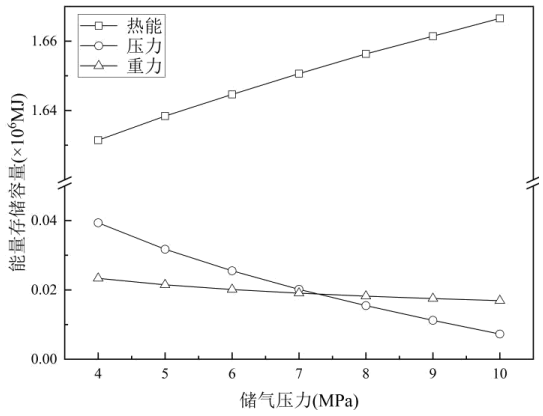


Fig.3 System Energy Storage Capacity Allocation

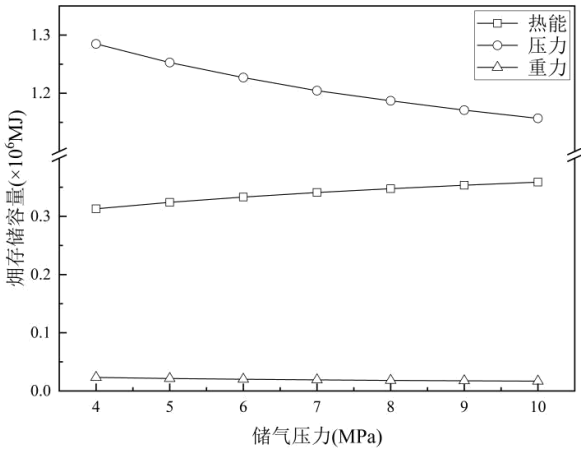


图 4 系统㶲存储容量分配

Fig.4 System Exergy Storage Capacity Allocation

进一步参考公式（1）至（5），可对系统存储㶲的容量进行理论推导和研究，结果如图 4 所示。可见存储空气的总能虽少，但由于压力势能品位显著高于热能，系统㶲的存储却以压力势能为主——这亦是 CAES 储能的核心原理所在。相反，能量存储的主体——热能对应的㶲容量则显著偏低，其随储气压力的提升而增大，暗示应适当提升压缩比及蓄热温度，以提高热能可产生的有用功量。

总体上，重力势能的总能量和㶲容量占比均不足 1%，说明其对重力 CAES 系统宏观能量特性影响较小，因而可从结构和经济性方面重点开展优化工作，以更好发挥其恒压功能。

1.2 储能效率分析

由于蓄热温度与储气压力均与空气压缩机组压缩比相关，通过调节储气压力，可同时研究蓄热温度与系统储能效率的变化趋势，结果如图 5 所示，其中左轴为系统效率，右轴为蓄热温度。

储能效率随储气压力的升高先升后降，并在 12

MPa 处取得最大值 68.33%。储气压力低于 12 MPa 时，储能效率随储气压力增大而增大，一是由于蓄热温度升高使得膨胀进气温度和发电㶲效率提升，二是储气压力提升时各换热器压损基本不变，系统压力势能损耗率有所下降。蓄热温度在储气压力 12 MPa 时接近 180 ℃上限，进一步提升储气压力需额外增加一台压缩机，导致压缩过程能耗上升、蓄热温度下降，系统效率开始下降。因而，选取 12 MPa 为加压水蓄热重力 CAES 系统最优储气压力。

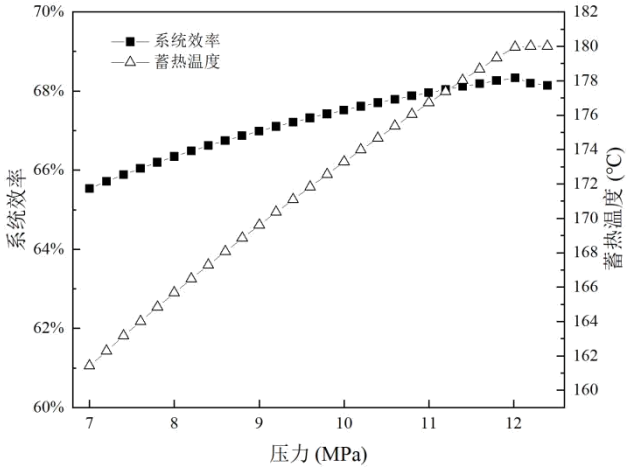


图 5 系统储能效率变化趋势

Fig.5 Variation Trend of System Energy Storage Efficiency

1.3 储能容积分析

以 12 MPa 为上限储气压力，通过调节下限储气压力对比恒容 CAES 与重力 CAES 系统储能效率及储气容积，结果如图 6 所示，其中横轴为重力储气库压力（即恒容储气库下限压力），左轴为储能效率，右轴为储气容积。

恒容系统储能效率随横轴压力升高呈上升趋势，但始终低于重力系统。由于恒容 CAES 一般通过调节末段压缩级压缩比及首级膨胀机膨胀比实现储气压力的动态匹配，因而滑压运行区间越窄，末段压缩机及首级膨胀机变工况幅度越小，系统效率损失越少，系统越趋近恒压模式，图 6 中恒容系统储能效率曲线逐渐向重力系统接近。

图 6 系统效率与储气容积对比

Fig.6 Comparison of System Efficiency and Gas Storage Volume

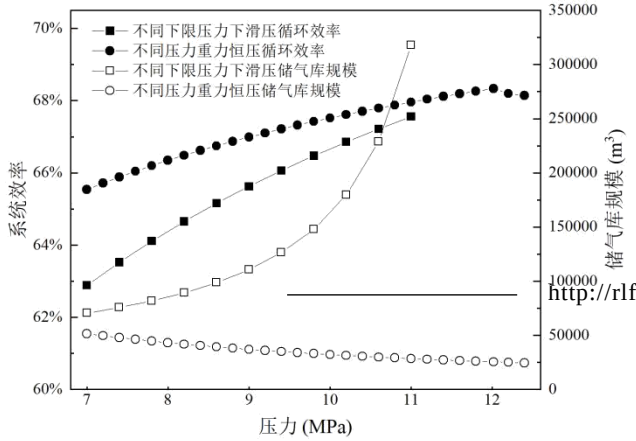
对于重力系统，储气压力提升使单位质量压缩空气膨胀区间增大、做功能力增大，同等发电容量所需膨胀气量减少，储气容积亦相应减小——这与图 3、图 4 压力势能总能及㶲的变化趋势一致。相反，下限储气压力上升虽能同样减少恒容系统膨胀发电所需气量，但由于下限储气压力以下“死气”占比提升，恒容储气库规模急剧扩大。在下限压力为 7 MPa 和 11 MPa 时，恒容储气容积约为 7.05×104 m³ 和 31.79×104 m³，而相应重力系统为 5.14×104 m³ 和 2.84×104 m³，分别减少 27.09%和 91.07%——高压储气条件下重力 CAES 储气容积和能量密度优势显著。

2 试验研究及原理验证

2.1 重力恒压试验台搭建

为验证重力储气库及重力 CAES 技术原理，本文搭建了重力 CAES 试验台。依托试验台可模拟完整的重力 CAES 系统储释能循环，研究重力储气库的实际稳压运行能力。

试验台核心重力储气库结构及设计参数分别如图 7 及表 2 所示。重力压块与承压筒一体构成活塞式压块结构，通过柔性密封膜与竖井壁面连接，在下部形成密封储气室；储气室设有进气口和排气口，分别连接压缩及膨胀设备；试验台装设四条垂直导轨，重力压块上对应安装两组导向装置，以支撑其直立悬浮和上下运行。



http://rlfd.cbpt.cnki.net

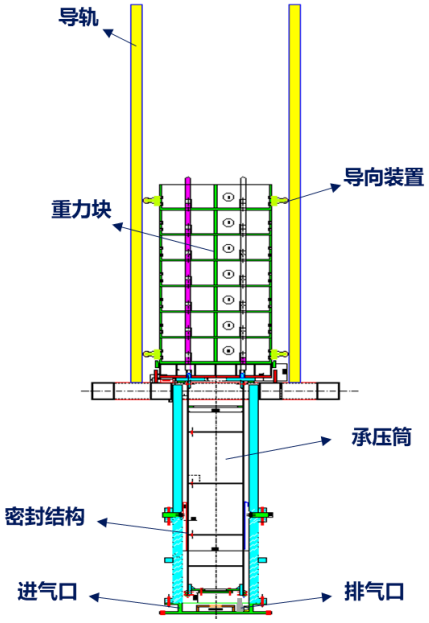


图 7 试验台重力储气库结构示意图

Fig.7 Schematic Diagram of Gravity Gas Storage Reservoir Structure for Test Bench

表 2 系统仿真边界参数取值

Tab.2 Boundary Parameter Values for System Simulation

序号	项目	参数
1	重力压块重量	7×750 kg
2	重力压块行程	2.13 m
3	平均充气速率	0.509 m^3/h
4	平均排气速率	0.455 m^3/h

表 2 模型参数依据弗劳德数相似准则（几何比 L = 10）由 1MW 示范工程原型参数[22]换算得出；重力储气库恒压运行的实现主要取决于力学平衡方程 $pA_1=Mg$（准静态条件下，其中，p 为储气室压力，A_1 为承压筒截面积，M 为重力压块质量）。基于该方程的尺度无关性，该原理验证结果可推广至其他压力等级与系统规模。当然，具体工程参数（密封材料、导向刚度等）需结合实际压力等级与规模开展专门验证。

2.2 重力恒压特性验证

试验台设计运行模式为：压缩储能过程充气时长为 60 min，充气完成后静置过程时长 20 min，随后开展时长为 60 min 的放气膨胀释能过程模拟。

图 8 所示为完整储释能过程中充放气流量与压块行程的对应关系，其中左轴为压块行程，右轴为空气流量。压块随充气过程连续上升，直至充气结束后悬浮稳定；充气过程压块行程曲线平滑，人为控制进气流量波动并未诱发压块行程上下震动，表明压块重力与储气压力的平衡状态稳定。静置储气 20 min 内压块行程未下降，表明储气室密封状态良好。放气过程中，在排气口阀门开度不变的条件下放气流量稳定，表明压块具备维持放气过程工况稳定的能力。

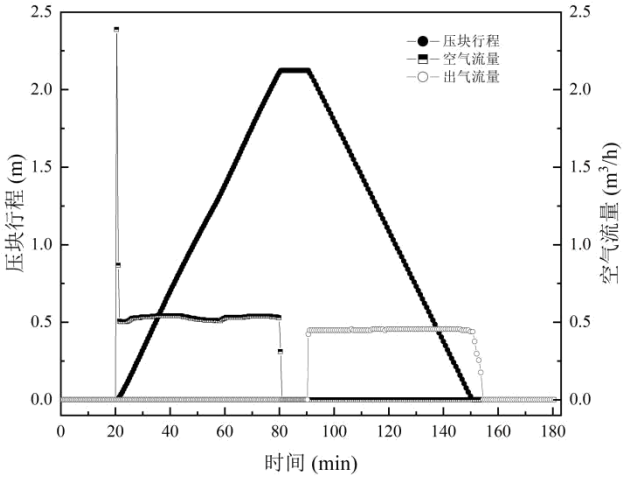


图 8 储释能过程流量及压块行程

Fig.8 Flow Rate and Pressure Block Stroke During Energy Storage and Release Process

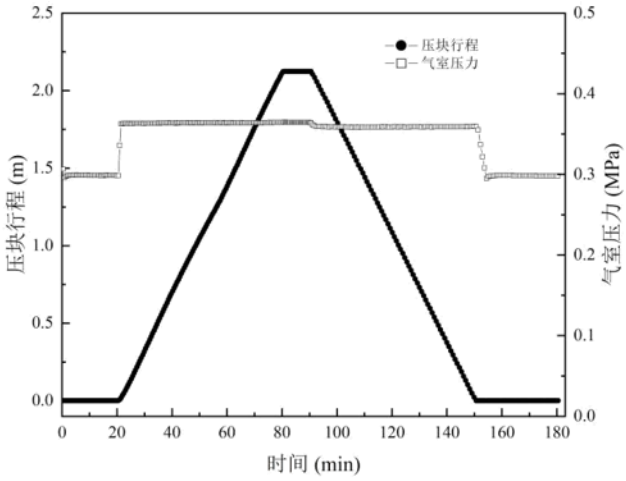


图 9 储释能过程储气压力及压块行程

Fig.9 Gas Storage Pressure and Pressure Block Stroke During Energy Storage and Release Process

图 9 进一步展示了同一储释能过程中储气压力的变化。对比图 8，充气流量波动条件下储气压力始终稳定在 0.367 MPa 水平；放气开始时刻，储气压力明显阶跃下降后稳定在 0.364 MPa 水平，这是由于压块启动时需首先克服其与导轨（图 7 所示）间的动摩擦力，一部分重力被抵消，从而致使压块重力与储气压力平衡点偏移；在充气流量波动及导轨摩擦影响下，重力储气库能够实现充放气稳压运

行。

根据图 9，机构摩擦等损失引起的压力偏差约为 0.06 MPa（含静摩擦阶跃约 0.003 MPa），相对于 2.5 MPa 工作压力约 2.4%，在 12 MPa 工况下预计占比更低（<0.5%），对系统效率的工程评估影响有限。

3 技术经济性分析

3.1 重力储气库经济性分析

根据试验验证，竖井腔体与重力压块耦合的气腔-活塞式结构可实现稳压运行。实际竖井腔体可通过岩土开挖构建，考虑一般地质条件工程可实施性，开挖深度超 1000 m 的竖井结构风险及施工难度较大。本文以 12 MPa 储气压力条件下 100MW×4h 重力 CAES 系统为例，对采用钢衬+围岩联合支护模式的造价成本（竖井开挖、承压区钢衬及用工）进行了初步分析[15]，结论如图 10 所示。图中所示双井、三井方案指同等竖井直径及总储气容积条件下，采用多井并联储气库的方案。

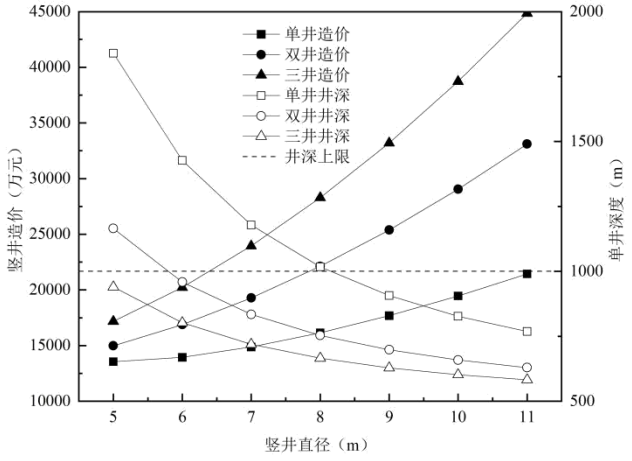


图 10 重力恒压储气库竖井造价对比

Fig.10 Cost Comparison of Shafts for Gravity Constant - Pressure Gas Storage Reservoirs

竖井直径确定时，储气库造价随并联井口数量的增加显著上升，且单井方案经济性最优，核心原因在于多井并联模式下，每口竖井均需依据压块行程配置非承压井段，导致竖井开挖成本增加。井数相同时，储气库造价随竖井直径的增大同样呈上升趋势，这是由于总储气量确定时，竖井直径增大虽可降低单井开挖深度，但压块的体积与直径平方正相关，导致压块的材料、用工成本快速攀升。

基于上述分析，选取 6m 直径双井并联储气库方案作为 100MW×4h 重力 CAES 系统总体经济性测算依据。重力 CAES 方案在百兆瓦级应用中的核心优势源于储气容积的大幅缩减（图 6），但也面临竖井施工风险、高压密封及万吨级压块稳定性控制等工程挑战。目前 1 MW 示范工程（储气压力 2.5 MPa）正在推进实施，将验证缩比试验到工程级放大的关键技术路径。对于更大规模系统，可采用多井并联方案实现容量扩展，但需在经济性与工程可行性之间进行优化权衡。

3.2 系统经济性分析

基于热力系统参数，本文以主设备投资系数 γ 估算压缩空气储能系统整体投资成本，如下所示：

$$I = (I_{\mathrm{c}} + I_{\mathrm{t}} + I_{\mathrm{h}} + I_{\mathrm{e}}) \times \gamma + I_{\mathrm{gs}} \tag{5}$$

式中：I 为项目总投资；I_c 为压缩机投资；I_t 为膨胀机投资；I_h 为蓄热器投资；I_e 为换热器投资；I_{gs} 为人工硐室投资；投资系数 γ 取 2。

进一步依据设备核心特性参数对式（5）中的主要设备投资成本进行评估[16-21]。

压缩机投资成本 I_c 评估如下：

$$I_{\mathrm{c}} = 7.90 \times (P_{\mathrm{c}}/0.7457)^{0.62} \times 1000 \times \varphi \tag{6}$$

式中，特性参数 P_c 为压缩机功率，单位 kW；φ 为美元汇率系数，取 7 元/美元。

膨胀机投资成本 I_t 评估如下：

$$I_{\mathrm{t}} = 0.378 \times (P_{\mathrm{t}}/0.7457)^{0.81} \times 1000 \times \varphi \tag{7}$$

式中，特性参数 P_t 为膨胀机功率，单位 kW。

换热器投资成本 I_e 评估如下：

$$I_e = 2.89275 f_d C_b \times \varphi \tag{8}$$

$$f_d = exp[-0.9816 + 0.830(ln\frac{A}{0.093})] \tag{9}$$

$$C_b = exp\begin{bmatrix} 8.821 - 0.30863(\ln\dfrac{A}{0.093}) \\ +0.0681(ln\dfrac{A}{0.093})^2 \end{bmatrix} \times \varphi \tag{10}$$

式中，系数 f_d、C_b 与换热面积 A 相关。

蓄热设备投资成本 I_h 评估如下：

$$I_{\mathrm{h}} = n \times 35000 \times V^{0.65} \tag{11}$$

式中，特性参数 V 为单个蓄热罐体积，单位为 m^3，n 为蓄热罐数量。

人工硐室投资成本 I_{gs} 评估如下：

$$I_{\mathrm{gs}} = 2500 \times V_{\mathrm{gs}}$$

12)

式中，特性参数 V_{gs} 为储气库容，单位 m^3。

参考蒙西电力现货市场，在上限储气压力 12MPa 条件下，通过调整人工硐室下限储气压力，对 100MW×4h 人工硐室恒容 CAES 及重力 CAES 的系统经济性进行分析对比，测算边界如表 3 所示。

表 3 系统经济性分析依据

Tab.3 Basis for System Economic Analysis

序号	项目	取值
1	峰电电价	0. 484 元/kWh
2	谷电电价	0.154 元/kWh
3	储能发电补偿	0.28 元/kWh
4	上网环节线损费	0.0088 元/kWh
5	政府性基金及附加	0.0224 元/kWh
6	系统运维费	0.0527 元/kWh
7	人员成本	20×25 万元
8	保险费率	总投资 0.25%
9	修理费提存率	总投资 1.5%
10	材料费	6 元/MWh
11	其他费用	3 元/MWh

重力 CAES 与人工硐室 CAES 系统总体投资成本与内部收益率两项经济性指标测算评估对比如图 11 所示。

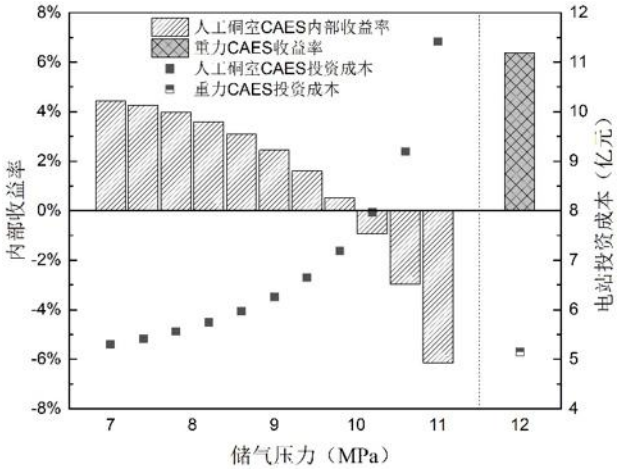


图 11 系统经济性测算

Fig.11 System Economic Calculation

相比人工硐室 CAES 最低 5.23 亿元的总投资，重力 CAES 测算总投资约 5.15 亿元，总体经济性良好。内部收益率方面，人工硐室 CAES 在下限储气压力为 7 MPa 时取得最大值 4.43%，随着下限储气压力的上升，储气库容积激增导致投资成本提升，因而总投资上升、收益率下降；重力 CAES 系统相较人工硐室 CAES 系统，初始投资成本更低，系统效率更优，折损电量承担的输配电价等费用更少，内部收益率更高，约为 6.38%。

4 结论及建议

本文通过理论分析、试验验证和经济性分析开展了重力 CAES 的研究，明确了重力 CAES 的良好技术经济性和应用潜力，主要结论如下：

（1）重力 CAES 系统能量和㶲的存储分为热能、压力势能和重力势能三部分，其中能量以热能为主，㶲以压力势能为主，重力势能占比均不足 1%；

（2）重力 CAES 系统理论储能效率可达 68.33%，在同等蓄热温度条件下整体优于恒容 CAES；

（3）同等储能容量条件下，恒压储气库容积低于恒容储气库，在上限储气压力为 12MPa 时，最大可减少 91.07%的容积需求；

（4）试验验证了重力恒压储气库的核心技术原理，该原理基于力学平衡基本方程，具有尺度无关性；具体的工程参数设计需结合实际压力等级与规模开展详细工程验证；

（5）现货市场下的测算分析表明重力 CAES 较人工硐室 CAES 具有一定经济性优势。

面向大规模推广应用，该技术仍有待开展进一步的岩土工程、结构力学及经济性等详细研究，并结合工程实施和现场验证，明晰实际储能特性，为推广应用提供数据支撑。

［参 考 文 献］

［1］ 舒印彪;陈国平;贺静波;张放.构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J].中国工程科学,2021,23(06):61-69.
Shu Yinbiao, Chen Guoping, He Jingbo, Zhang Fang. Building a New Electric Power System Based on New Energy Sources[J]. Strategic Study of CAE,2021,23(06):61-69.

［2］ 梅生伟;张通;张学林;王亚洲;王国华;卢强;薛小代.非补燃压缩空气储能研究及工程实践——以金坛国家示范项目为例[J].实验技术与管理,2022,39(05):1-8+14.DOI:10.16791/j.cnki.sjg.2022.05.001.
MEI Shengwei, ZHANG Tong, ZHANG Xuelin, WANG Yazhou，WANG Guohua, LU Qiang, XUE Xiaodai. Research and engineering practice of non-supplementary combustion compressed air energy storage: Taking Jintan national demonstration project as an example[J]. Experimental Technology and Management,2022,39(05):1-8+14.DOI:10.16791/j.cnki.sjg.2022.05.001.

［3］ 袁照威;杨易凡.压缩空气储能技术研究现状及发展趋势[J].南方能源建设,2024,11(02):146-153.DOI:10.16516/j.ceec.2024.2.14.
YUAN Zhaowei, YANG Yifan. Research status and development trend of compressed air energy storage technology [J]. Southern energy construction, 2024,

11(2): 146-153. DOI：10.16516/j.ceec.2024.2.14.
[4] Kubala P , Markowski J .Comparison of methods for discharging an isochoric compressed air tank in compressed air energy storage systems[J].Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2812(1):012020.DOI:10.1088/1742-6596/2812/1/012020 .
[5] Budt M , Wolf D , Span R ,et al.A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments[J].Applied Energy, 2016.DOI:10.1016/j.apenergy.2016.02.108.
[6] Succar S , Williams R H .Compressed air energy storage: theory, resources, and applications for wind power, Princeton Environmental Institute[J]. 2008.
[7] Jidai W , Kunpeng L , Lan M ,et al. Overview of Compressed Air Energy Storage and Technology Development[J].Energies, 2017, 10(7):991.DOI:10.3390/en10070991.
[8] Zhang X , Xue X , Zhang T ,et al.Thermodynamic and economic analysis of a novel gravity-enhanced compressed air energy storage system[J].Energy Science & Engineering, 2022, 10(10):17.DOI:10.1002/ese3.1265.
[9] Zhang L , Xie M , Ye K ,et al.Compressed air energy storage based on variable-volume air storage: A review[J].Journal of Energy Storage, 2025, 110(000).DOI:10.1016/j.est.2025.115361.
[10] PIMM A J, GARVEY S D, DREW R J. Shape and cost analysis of pressurized fabric structures for subsea compressed air energy storage[J]. Proceedings of theInstitution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science,2011,225(5):1027-1043.
[11] VASEL-BE-HAGH A R，CARRIVEAU R，TING D S K．Flow over submerged energy storage balloons in closely and widely spaced floral configurations[J]．Ocean Engineering，2015，95：59-77．
[12] MAS J, REZOLA J M. Tubular design for underwater compressed air energy storage[J]．Journal of Energy Storage，2016，8：27-34.
[13] Hydrostor . Goderich energy storage facility[EB/OL] . Toronto ： Hydrostor [2022-10-28]．https://www.hydrostor.ca/goderich-a-caes-facility/
[14] MAZLOUM Y, SAYAH H, NEMER M. Exergy analysis and exergoeconomic optimization of a constant-pressure adiabatic compressed air energy storage system[J]. Journal of Energy Storage, 2017, 14: 192-202.
[15] 何鹏云,方越.正井法矿用成套设备施工深竖井经济分析[J].云南水力发电,2023,39(08):188-192.
HE Peng-yun, FANG Yue. Economic Analysis of Deep Vertical Shaft Construction with Complete Equipment Used in Normal Well Mining [J]. YUNNAN WATER POWER,2023,39(08):188-192.
[16] Couper J R ,Penney W R ,Fair J R , et al. COSTS OFINDIVIDUAL EQUIPMENT - ScienceDirect[J]. ChemicalProcess Equipment (Revised Second Edition), 2010:717-726.
[17] Razmi, Amirreza, et al. "Thermodynamic and economic investigation of a novel integration of the absorption-recompression refrigeration system with compressed air energy storage (CAES)." Energy conversion and management 187 (2019): 262-273.
[18] Shaeiwitz J A. Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes, 5th Edition[M]. 2018.
[19] Houssainy, Sammy, Mohammad Janbozorgi, and Pirouz Kavehpour. "Thermodynamic performance and cost optimization of a novel hybrid thermal-compressed air energy storage system design." Journal of Energy Storage 18 (2018): 206-217.
[20] 李军徽,付英男,李翠萍等.提升风电消纳的储热电混合储能系统经济优化配置[J].电网技术,2020,44(12):4547-4557.DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0185a.
Li junhui, Fu yingnan, Li cuiping,et al. Economic Optimal Configuration of Hybrid Energy Storage System for Improving Wind Power Consumption [J]. Power System Technology , 2020, 44(12): 4547-4557. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0185a.
[21] 何青,罗宁,刘文毅.基于全寿命周期成本的压缩空气储能系统储气装置经济性分析[J].化工进，2018, 37(A01):8.DOI:CNKI:SUN:HGJZ.0.2018-S1-010.
He qing, Luo ning, Liu wenyi, et al. Economic analysis of gas storage devices for compressed air energy storage system based on life cycle cost[J]. CHEMICAL INDUSTRY AND ENGINEERING PROGRESS, 2018, 37(A01):8. DOI:CNKI:SUN:HGJZ.0.2018-S1-010.
[21] Ni Weixiang, Hu Ya’an, Li Zhonghua, et al. Operational stability control technology for gravity blocks in gravity compressed air energy storage systems [C]. In: Proceedings of Hydropower and Renewable Energies Conference, Suzhou, China, Oct 24-27, 2025.

（责任编辑 XXX）