DOI: 10.19666/j.rlfd.202510070

计及喷射器性能的压缩空气储能系统释能发电效益研究

文贤馗[1]，王 维[2]，张世海[1]，周 科[1]，曾栋坪[2]
（1. 贵州电网电力科学研究院，贵州 贵阳，550002；
2. 长沙理工大学能源与动力工程学院，湖南 长沙，410114）

［摘 要］【目的】针对日尺度电网负荷周期性波动导致的源-荷失衡问题，研究压缩空气储能（compressed air energy storage，CAES）系统中喷射器的性能优化方法，以提升系统整体能效与运行调控能力。在 CAES 系统中，喷射器兼具调节空气参数与引射低压乏气的双重功能，其工作性能对系统效率具有重要影响。【方法】以某在建 10 MW 级 CAES 示范系统为研究对象，结合响应面法与 CFD 软件数值模拟，分析喷射器在变压运行条件下的性能特性，确定其高效工作区间；进一步基于性能结果和释能变压力特性设计储气罐容积，并预测系统发电能力。【结果】喷射器的引射性能对工作气体压力与引射乏气压力变化敏感，在工作气体压力为 10.00~11.75 MPa、引射乏气压力为 5.6 MPa 时，喷射器的引射性能表现最优。喷射器的出口背压对其内部的流场结构与 CAES 系统的运行工况影响显著。当背压为 8.0 MPa 时，喷射器在工作压力为 12.00~10.00 MPa 时高效运行，能量利用率最高达 10.46%；配置 2.2×10^3 m^3 储气罐的 CAES 系统在背压 8.0 MPa 条件下，能够以设计功率持续运行 4.0 h，其能量转化率为 16.67%，释能发电量累计达 5.01×10^4 kW h，较无喷射器系统提升 2.04%。【结论】通过明确喷射器高效运行区间并合理配置储气罐容积，可有效提高 CAES 系统发电效益，为工程实际中的系统优化与运行策略制定提供依据。

［关 键 词］压缩空气储能系统；喷射器；配气策略；容积设计；发电量预测

［引用本文格式］文贤馗，王维，张世海，等. 计及喷射器性能的压缩空气储能系统释能发电效益研究[J]. 热力发电，2026，55(2)：65-74. WEN Xiankui, WANG Wei, ZHANG Shihai, et al.. Study on energy release power generation efficiency of CAES systems considering injector performance[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(2): 65-74.

Study on energy release power generation efficiency of CAES systems considering injector performance

WEN Xiankui[1], WANG Wei[2], ZHANG Shihai[1], ZHOU Ke[1], ZENG Dongping[2]
(1. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Guiyang 550002, China;
2. School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Objective] Against the source-load imbalance caused by daily-scale periodic fluctuations in grid loads, this study investigates performance optimization methods for ejectors within compressed air energy storage (CAES) systems. The aim is to improve the overall efficiency of CAES systems in terms of power generation during energy release, as well as enhance their operational control capabilities during actual operation. In CAES systems, the ejector performs the dual functions of regulating the state parameters of the working gas and introducing low-pressure exhaust gas. This critically affects the system efficiency. [Methods] By taking a 10 MW-class CAES

收 稿 日 期：2025-10-28 修 回 日 期：2025-11-26 接 受 日 期：2025-12-02 网络首发日期：2025-12-31
基 金 项 目：国家重点研发计划（2024YFE0208100）；贵州省科技创新人才团队（黔科合平台人才-CXTD[2022]008）；南方电网公司重点科技项目（GZKJXM20222304）
Supported by: National Key Research and Development Program (2024YFE0208100); Guizhou Provincial Science and Technology Innovation Talent Team (Qiankehe Platform Talent-CXTD[2022]008); Key Science and Technology Projects of China Southern Power Grid Company (GZKJXM20222304)
第一作者简介：文贤馗（1972），男，教授级高级工程师，主要研究方向为储能及新能源，13985410224@139.com。
通信作者简介：曾栋坪（1994），男，博士，讲师，主要研究方向为流体机械内部流动机理，zengdp@csust.edu.cn。

demonstration system under construction as the research subject, this study combines response surface methodology with Computational Fluid Dynamics (CFD) numerical simulation to analyze the ejector's entrainment performance under varying working gas pressures, entrainment exhaust gas pressures, and outlet backpressure conditions. This determines the ejector's efficient operating range. Subsequently, the volume of the storage tank is designed based on the entrainment performance results of the ejector and the variable pressure operating conditions during the energy release process of the CAES system. The power generation capacity of the CAES system is then predicted using a theoretical model. [Results] The entrainment performance of the ejector is sensitive to variations in the working gas pressure and the entrainment exhaust gas pressure. Optimal entrainment characteristics are achieved when the working gas pressure is between 10.0 and 11.75 MPa, and the entrainment exhaust gas pressure is 5.6 MPa. The outlet back pressure of the ejector significantly affects the structure of the internal flow field and the operational window of the CAES system. Higher back pressure results in a narrower operating pressure range, necessitating larger storage tank volumes and reducing energy release efficiency. When the back pressure is 8.0 MPa, the ejector operates efficiently within a working pressure range of 10.00~12.00 MPa, achieving an energy utilization efficiency rate of 10.46%. A CAES system with a 2.2×10^3 m^3 storage tank can sustain continuous operation at design power for 4.0 hours under a back pressure of 8.0 MPa. Its energy conversion efficiency is 16.67%, with cumulative energy released for power generation reaching 5.01×10^4 kW·h. This represents a 2.04% improvement on systems without an ejector. [Conclusion] Defining the high-efficiency operating range of the ejector and rationally configuring the air storage tank volume can effectively enhance the power generation capabilities of the CAES system, providing a foundation for optimizing the system and formulating operational strategies in engineering practice.

Key words: compressed air energy storage systems; jet ejector; air distribution strategy; volume design; power generation forecast

在“双碳”战略目标深入推进的关键时期，随着风光等新能源装机规模迅速扩大，电网源-荷平衡面临严峻挑战，亟需发展能够快速消纳盈余电力、并在用电高峰时段可靠供电的储能技术[1-3]。压缩空气储能（compressed air energy storage，CAES）系统因具备部署灵活、响应迅速、环境友好等优势，被广泛用于平滑电网负荷波动，即在用电低谷期储存剩余电能，在用电高峰期释放电能以满足持续用电需求[4-6]。然而，在实际运行中，CAES 系统释能环节存在显著的节流损失，且储气设备容积与用电需求之间的匹配关系尚不明确，制约了其整体能效与运行经济性[7-9]。为降低节流损失，提升系统效率，有研究提出采用喷射器替代传统节流阀，利用工作气体引射乏气再次进入透平做功，从而增强能量利用率[10]。基于该思路，本文进一步设计多种运行工况，对 CAES 系统的发电能力进行预测，以支撑电网调峰。

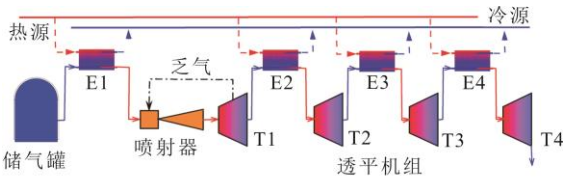
CAES 系统装机灵活、吐纳电量迅速，但其储气成本较大，运营效益有待提高[11-12]。目前，国内外学者针对 CAES 系统的能效提升与运行策略优化已展开广泛研究。在关键部件优化方面，部分研究聚焦于喷射器结构设计与流动特性，包括喷嘴收敛段型线优化[13]，内流场激波结构影响分析[14]以及不同压力[15]与温度[16]条件下喷射器引射性能的评估，旨在降低其运行能耗、提高工作效率。在系统层面，郭祚刚等[17]通过引入喷射器引射乏气，提升了 CAES 系统恒压运行效率，但未涉及释能全过程的动态能效分析。另有研究表明，系统各组件的㶲损[18]、各过程的等熵效率[19]以及储气容积设计[20]对整体效率影响显著。陈泽兵等[21]通过调控总压与流量优化透平功率输出，延长发电时间并提升能量密度。此外，系统动态运行特性与控制策略亦受到关注[22]。赵峰等[23]采用分程控制策略，有效降低了系统气耗率；葛士宇等[24]通过光储协同运行，提升了整体发电效率。上述研究从不同角度揭示了喷射器在 CAES 系统中的增效潜力及调控策略对系统性能的改善效果。然而，在 CAES 系统实际变压释能过程中，喷射器的高效运行区间、适应不同背压条件的储气罐容积配置，以及系统在规定时段内的总发电量预测等问题，仍未得到系统性阐述。

为此，本文以某在建 10.0 MW CAES 示范系统为对象，提出采用喷射器引射乏气二次做功的运行策略，探索其在日尺度下的运行方案，并结合不同储气容积预测系统发电能力，以提升 CAES 系统的发电效益。首先，通过 17 组不同工况下的喷射器引射性能计算，结合响应面法分析关键变量对其性能的敏感性，识别制约引射效果的边界条件；其次，研究低背压、中背压、高背压及过背压条件下喷射器内流场特性与压能利用率，明确其高效运行区间；最后，基于科学原理设计储气罐容积并预测系统发电量，在满足负荷需求的前提下优选方案以提升系统能效。研究结果旨在为在建 CAES 系统的储气容积配置与运行能效优化提供理论依据与设计参考。

1 储能系统及计算模型

1.1 CAES 系统及喷射器模型

图 1 为 CAES 系统的释能流程及带调控针阀的喷射器模型。CAES 系统由储气罐、换热器、喷射器、透平组及承担换热媒介的冷源和热源组成。图 1a)中，系统在释能过程中从储气罐 S 流出的高压工作气体首先进入换热器 E1，在进行充分加热以保证喷射器性能充足，然后进入喷射器引射一级透平的中间级乏气，喷射器出口的混合气体进入透平组做功发电。其中由上游高压透平排出的气体先进入级间换热器加热，然后进入下游低压透平再次做功。图 1b)中，喷射器主要由中心喷嘴和调控开度的针阀结构组成，其中的工作气体通过喷射器引射下游低压乏气，并在充分混合后进入透平做功。在 CAES 系统释能过程中，喷射器在储气罐与透平之间承担工作介质参数的调控作用。



a) CAES系统释能模型



b) 带调控针阀的喷射器简化模型

图 1 CAES 系统释能流程及带调控针阀的喷射器模型
Fig.1 Energy release process of the CAES system and the ejector model with control needle valve

1.2 控制方程及计算模型

1）控制方程

针对喷射器内的可压缩空气流动选用 Navier-Stokes 方程进行数值仿真计算，综合考虑真实气体的状态方程和黏性耗散的能量方程，变密度空气流控制方程变式如下。

连续方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \tag{1}$$

式中：ρ为介质密度，kg/m^3；t 为流动时间，s；u_i 为介质速度，m/s。

动量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial P}{\partial x_i}+\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{2}$$

式中：P 为流场压力，Pa；τ_{ij} 为应力张量，N/m^2。

能量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)+\frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E+P)]=\vec{\nabla}\cdot[u_j(\tau_{ij})] \tag{3}$$

其中，

$$\tau_{ij}=\alpha_{\text{eff}}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\mu_{\text{eff}}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\sigma_{ij} \tag{4}$$

式中：E 为介质总能量，kJ；α_{ij} 为介质有效导热率，W/(m·K)；μ_{ij} 为介质动力学黏度，Pa·s。

2）部件出力模型

在储气罐内根据质量守恒定律，其满载时空气的质量等于释能过程结束后储气罐的剩余空气与进入透平做功空气的质量之和，此过程储气罐恒温，有：

$$m=\frac{P_1\cdot q_{\text{m}}\tau_{\text{T}}}{P_1-P_2} \tag{5}$$

式中：m 为储气罐空气总质量，kg；P_1、P_2 分别为储气罐释能开始和结束时的压力，Pa；q_{m} 为流出储气罐的空气流量，kg/m^3；τ_{T} 为释能时间，h。

换热器作为一个开口能量系统，其工作过程符合质量守恒和能量守恒基本方程。根据守恒定律，换热器内冷热流体的换热量 Q 为：

$$Q=q_{\text{c,out}}h_{\text{out}}-q_{\text{c,in}}h_{\text{in}} \tag{6}$$

式中：$q_{\text{c,in}}$、$q_{\text{c,out}}$ 分别为空气充分加热前、后的质量流量，kg/s；h_{in}、h_{out} 分别为空气加热前、后的比焓，J/kg。

压缩空气通过透平向外做功，其膨胀过程简化为绝热，对于配备喷射器的 CAES 系统，在释能过程中总输出功率等于系统基础功率与喷射器增效功率之和，则有：

$$q_{\text{m,z}}=q_1+q_2 \tag{7}$$

$$P_{\text{y}}=q_1(h_{\text{Ti,in}}-h_{\text{Ti,out}}) \tag{8}$$

$$P_{\text{z}}=q_2(h_{\text{Ti,in}}-h_{\text{Ti,out}}) \tag{9}$$

$$P_{\text{t}}=P_{\text{y}}+P_{\text{z}} \tag{10}$$

式中：$q_{\text{m,z}}$、q_1 和 q_2 分别为进入透平的空气流量、从储气罐流出空气的流量和引射乏气的流量，kg/s；P_{y}、P_{z} 分别为工作气体推动透平做功的基础功率和乏气二次做功的增效功率，MW；$h_{\text{Ti,in}}$、$h_{\text{Ti,out}}$ 分别为透平进、出口处的气体比焓，J/kg；P_{t} 为 CAES 系统释能过程总的输出功率，MW。

3）系统能效模型

喷射器利用工作气体的过余压能引射低压乏气，以提高其出口流量。在这个过程中，对于喷射

器压能利用率α，有：

$$\alpha=\frac{E_{\mathrm{s}}}{E_{\mathrm{e}}} \tag{11}$$

式中：E_{s}为乏气在被引射的过程中吸收的能量，J；E_{e}为工作气体在引射乏气时耗散的能量，J。

随着 CAES 系统持续释能发电，储气罐内压力降低，当储气罐的压力水平低于喷射器的失效压力后便不能推动透平发电，释能过程结束。对于 CAES 系统释能过程的能量转化率η，有：

$$\eta=1-\frac{E_{\mathrm{w}}}{E_{\mathrm{f}}} \tag{12}$$

式中：E_{w}为释能结束后，储气罐内滞留气体的能量，J；E_{f}为储气罐满载气体总的能量，J。

2 数值仿真及网格验证

2.1 网格模型及边界条件

采用结构化网格划分方法将可调式喷射器模型划分为二维轴对称流场网格，并对其流道壁面和中心轴线附近进行网格加密。以喷射器中心轴线的吸入管出口处为原点，轴向为 x 方向（向右为正），沿径向为 y 方向（向上为正），如图 2 所示。网格模型由流体域和调控针阀两部分组成，其中，流体域可以根据结构和工作介质的状态细分为工作气体接收室、低压乏气吸入管、混合室及扩压室。

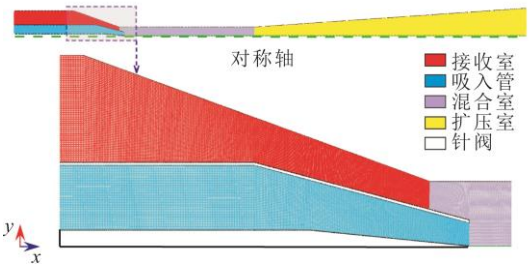


图 2 带调控针阀的喷射器网格示意

Fig.2 Schematic diagram of an ejector grid with control needle valve

将网格导入 Fluent 软件后，选择基于压力-速度耦合的稳态求解器。由于 CAES 系统内喷射器出口背压较高，为了规避回流，需要大流量的工作气体进入喷射器引射乏气，故采用通过吸入管引射低压乏气的方案进行数值仿真的边界条件设置：接受室左端为工作气体入口；吸入管左端为低压乏气入口；扩压室右端为混合气体出口；环境温度统一设置为 373 K，流道壁面为无滑移壁面，其他设置保持默认状态。

2.2 网格无关性验证及有效性分析

喷射器出口处的空气流量对下游透平的释能功率影响显著，故加密喷射器出口处网格，得到网格数为 98 753、147 954、199 639、248 668、310 795 的 5 种算例进行无关性验证。采用计算流体力学软件 Fluent 2024 R2 湍流模型 Realizable k-ε对不同工况下喷射器内的气体交汇、引射过程进行数值模拟。保持工作气体压力为 12.0 MPa，当射流流场计算收敛后，得到喷射器出口处空气质量流量随网格数量的变化特征，结果如图 3 所示。由图 3 可见，随网格数量的增加，空气质量流量也随之增大；当网格数量大于 25 万后，出口空气质量流量增幅渐缓，表明计算结果已不受网格尺寸影响。在满足计算精度的前提下，为提高计算效率，选择网格数为 248 668 的网格模型进行仿真分析。

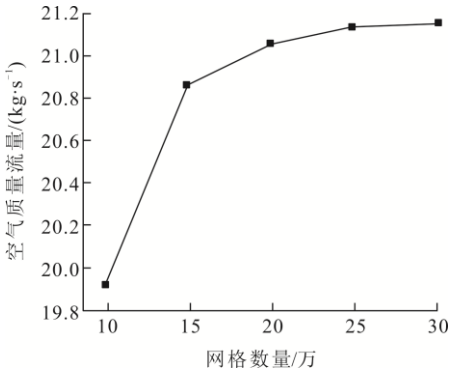


图 3 喷射器出口处空气质量流量随网格数量变化特征

Fig.3 Changing characteristics of the flow rate at the ejector outlet with grid number

3 结果与分析

3.1 变压力工况下喷射器引射性能分析

喷射器的引射性能与工作气体的温度密切相关，图 4 为喷射器引射性能的温度敏感特性曲线。由图 4 可见，在工作气体压力为 12.0 MPa、低压乏气压力为 5.6 MPa、出口背压为 8.0 MPa 的边界条件下，喷射器的引射比随温度的增大呈现上升趋势，而喷射器出口总的质量流量却逐渐下降，当工作气体温度为 373.0 K 时，相对透平额定流量为 1.01。为保证透平能够在设计工况运行，工作气体的温度不宜超过 373.0 K。

为了提高系统能效，综合分析 CAES 系统释能过程中喷射器内工作气体压力、引射乏气压力及出口背压对其引射性能的影响。表 1 为求解喷射器最

佳引射比所选取的 3 种影响因子及其水平值实验设计，采用 Design Expert 13.0 软件中的 Box-Behnken 模型开展响应面法分析。

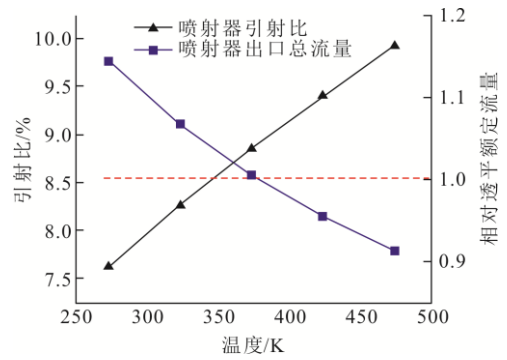


图 4 喷射器引射性能的温度敏感性特征曲线
Fig.4 Temperature sensitivity characteristic curve of the ejector's entrainment performance

表 1 喷射器性能影响因子及水平
Tab.1 Factors affecting the ejector's performance and their levels

影响因子	–1	0	1
A 工作气体压力/MPa	10.0	12.5	15.0
B 引射乏气压力/MPa	4.2	4.9	5.6
C 出口背压/MPa	7.0	8.0	9.0

表 2 为喷射器变工况参数明细，图 5 为按照表 2 的 17 组实验方案进行数值仿真，得到的压力耦合喷射器引射比响应曲面。由图 5a)可见，当出口背压为常量时，喷射器的引射比随气体工作压力的增大先升高后降低，而随乏气压力的增大单调递增。图 5b)可见，当乏气压力为常量时，喷射器的引射比随气体工作压力的变化呈现明显的抛物线趋势，其中气体工作压力值较小时，出口背压增大引射比增大，而气体工作压力值较大时，出口背压增大引射比降低。图 5c)可见，当气体工作压力为常量时，引射比随乏气压力增大而升高，随出口背压增大而降低。因此，气体工作压力、乏气压力耦合影响显著，气体工作压力、出口背压耦合影响一般，乏气压力、出口背压影响不明显。在气源压力有限的条件下，为发挥喷射器的最佳性能，工作气体的压力区间为 10.00~11.75 MPa，引射乏气的压力取 5.60 MPa，而出口背压的取值对引射比的影响较小。

表 2 喷射器变工况参数明细
Tab.2 Detailed specification of variable operating conditions for ejectors

序号	工作压力/MPa	乏气压力/MPa	出口背压/MPa	引射比/%
1	10.0	4.2	8.0	–1.76
2	15.0	4.2	8.0	3.41
3	10.0	5.6	8.0	6.14
4	15.0	5.6	8.0	6.56
5	10.0	4.9	7.0	9.36
6	15.0	4.9	7.0	5.13
7	10.0	4.9	9.0	–6.65
8	15.0	4.9	9.0	5.13
9	12.5	4.2	7.0	5.46
10	12.5	5.6	7.0	8.44
11	12.5	4.2	9.0	5.46
12	12.5	5.6	9.0	8.44
13	12.5	4.9	8.0	7.09
14	12.5	4.9	8.0	7.09
15	12.5	4.9	8.0	7.09
16	12.5	4.9	8.0	7.08
17	12.5	4.9	8.0	7.09

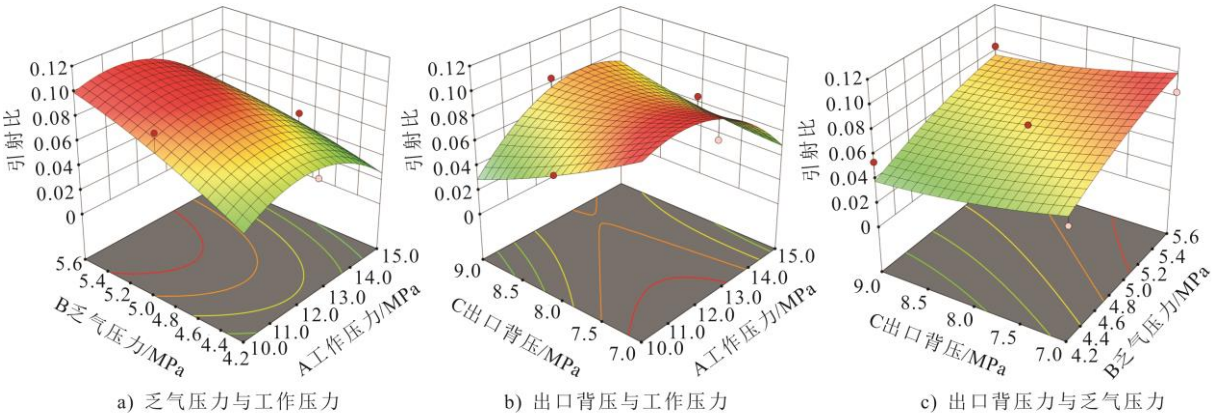


图 5 压力耦合引射比响应曲面
Fig.5 Pressure-coupled ejection ratio response surface

3.2 不同背压工况下喷射器能效分析

为了进一步探究出口背压对 CAES 系统喷射器效率的影响规律，依据响应面分析的结果，该部分采用 11.75 MPa 的工作气体引射 5.60 MPa 的低压乏

气，开展在低、中、高背压及过背压工况下的喷射器内部流场特性研究。图 6 为不同背压工况下喷射器内的矢量速度曲线和压力分布云图。由图 6 可见：在喷射器出口背压分别为 7.0、8.0 MPa 的低、中背压工况下，进入喷射器的工作气体在完成引射乏气后，相较于 11.75 MPa 的工作气体压力，喷射器 7.0、8.0 MPa 工况下的出口背压较低，工作气体的过余压力进一步加速混合气体。同时，伴随着跨音速流动现象出现的激波在整个混合室内蔓延；在喷射器出口背压为 9.0 MPa 的高背压工况下，工作气体仅能诱发小范围激波，促使混合室的入口形成局部低压区域，增强引射乏气的能力。此时，喷射器内交汇后的混合气体迅速降低至亚音速，无大范围激波现象；在喷射器出口背压为 10.0 MPa 的过背压工况下，乏气吸入管内，喷射器内流场出现明显的回流，这是因为工作气体无法克服背压向出口流动，而是屈服于背压并向着乏气进口反向流动，此时喷射器失效。可见，喷射器出口背压水平直接影响喷射器内流场的流动特性，进而影响喷射器的引射性能及能量转化效率。

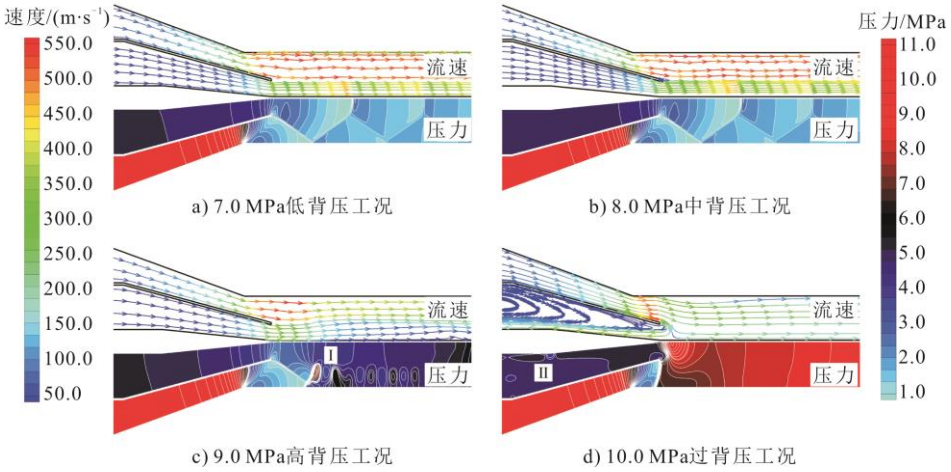


图 6 不同背压下喷射器内流场速度和压力分布云图

Fig.6 Velocity and pressure distribution contour maps in the flow field of an ejector at different back pressures

为节约气耗，提高能效，进一步开展不同背压工况下喷射器的最佳引射比和压能利用效率的研究，图 7 为不同背压下喷射器的引射性能曲线。

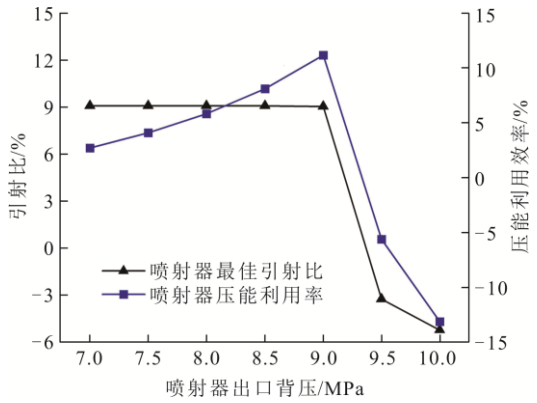


图 7 不同背压下喷射器的引射性能曲线

Fig.7 The ejector's entrainment performance curves at different back pressures

由图 7 可见，在喷射器出口背压由 7.0 MPa 增加至 9.0 MPa 的过程中，喷射器的引射比维持在 9.06%，而喷射器的压能利用率不断提升并在出口背压为 9.0 MPa 时达到极值 11.16%；当喷射器的出口背压高于 9.0 MPa 时，喷射器的最佳引射比和压能利用骤降，这是由于出口背压过高，工作气体不再能克服背压引射乏气，而是向乏气进口方向逆流，导致的引射比剧减，同时，工作气体的过余压能无法传递给低压乏气，使压能利用率骤减，喷射器最终失效。可见，随着喷射器出口的预设背压增加，喷射器的引射比先不变后显著下降，而喷射器的压能利用率呈现先上升后下降的趋势，且在出口背压高于 9.0 MPa 时喷射器接近失效。

随着 CAES 系统的持续释能，储气罐内的气量减小，压力降低，这将直接影响喷射器的引射性能。图 8 为储气罐不同压力水平时喷射器的引射比和能量利用效率变化曲线。

由图 8a)可见：在气源压力充足时，不同背压下喷射器的引射比基本一致；随着气源压力降低，较高背压高工况下喷射器的引射比最先下降，导致其运行区间较窄，为 12.0~11.0 MPa；较低背压工况下喷射器则有更宽泛的运行区间，出口背压分别为

8.0、7.0 MPa 时喷射器对应的运行压力区间分别为 12.0~10.0 MPa 和 12.0~7.8 MPa。因此，喷射器可以正常工作的压力区间与喷射器出口的背压密切相关。

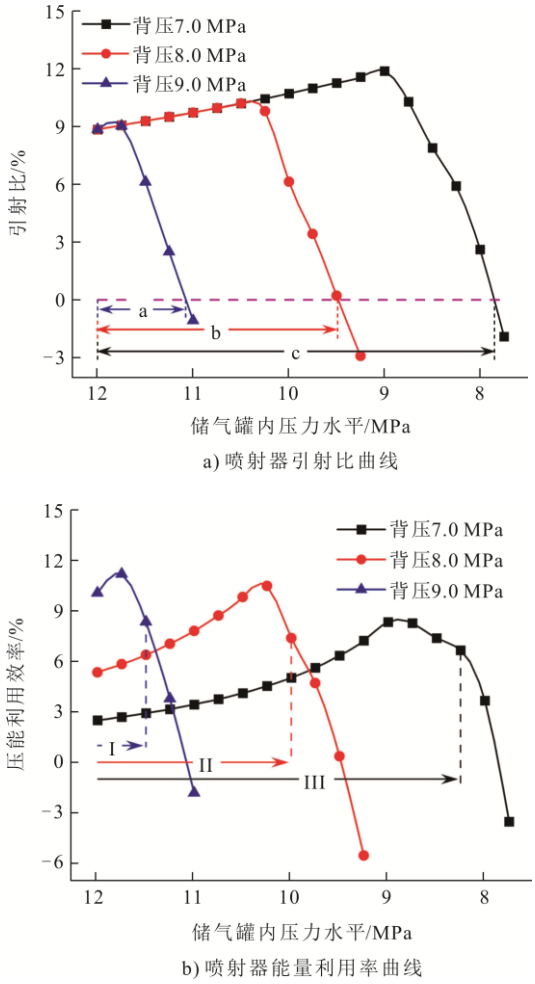


图 8 不同背压下喷射器的性能变化曲线
Fig.8 Performance variation curves of the ejectors at different back pressures

喷射器的出口背压在限制喷射器性能的同时也会影响喷射器的能量利用效率。由图 8b)可见，喷射器的能量利用效率随着储气罐压力水平的下降呈现先增大后减小的趋势，且较高出口背压工况下喷射器具有更高能量利用率峰值。当出口背压分别为 9.0、8.0、7.0 MPa 时，喷射器能量利用率极值对应 11.16%、10.46%和 8.33%。同时，较高的出口背压会在一定程度上限制喷射器高效运行的压力区间。出口背压为 7.0、8.0、9.0 MPa 的喷射器在高效运行时，工作气体的压力范围分别为 12.00~11.50 MPa、12.00~10.00 MPa 和 12.00~8.25 MPa。在气源压力有限的条件下，喷射器的出口背压与能量利用效率正相关，但较高的背压导致其高效运行区间较窄。

3.3 CAES 系统理论发电量和能效分析

依据某地区居民用电高峰集于 8:00—12:00 和 18:00—22:00 的实际状况，为充分发挥 CAES 系统削峰填谷的优势，稳定电网的供需平衡，要求 CAES 系统能够实现在不低于 4.0 h 的时间段内不间断释能发电。

针对喷射器在不同工况下的高效运行区间偏差和 CAES 系统的工作时长限制，该部分对喷射器在不同背压工况下配备储气罐的设计参数和 CAES 系统的理论发电量进行预测。图 9 为不同工况下配备的储气罐参数和计算发电量。

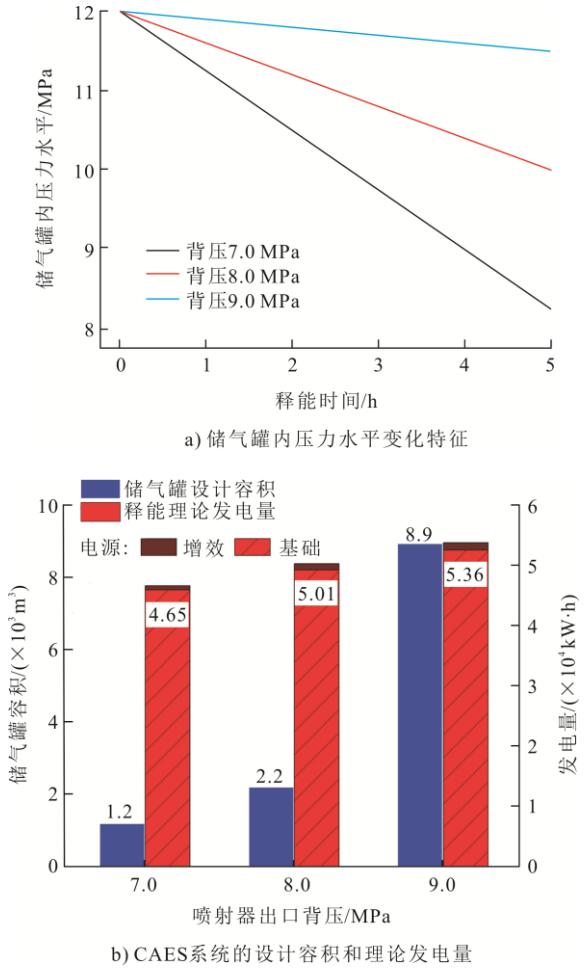


图 9 不同工况下配备的储气罐参数和计算发电量
Fig.9 The air tank parameters and power generation calculations under different operating conditions

由图 9 可见，为了满足 CAES 系统释能时喷射器可以引射一级透平组出口 5.6 MPa 的低压乏气，配备满载压力 12.0 MPa 的储气罐，图 9a)中，随着释能过程中工作气体流出，储气罐内压力水平

逐渐降低。另外，为了适应用电高峰期的用电需求，出口背压分别为 7.0、8.0、9.0 MPa 工况下的喷射器，在释能结束时储气罐内的压力应不低于 8.25、10.00、11.50 MPa。出口背压为 7.0、8.0、9.0 MPa 的喷射器配备储气罐的容积分别为 1.2×10^3、2.2×10^3、8.9×10^3 m³，其计算的理论发电量分别为 4.65×10^4、5.01×10^4、5.36×10^4 kW·h，较无喷射器的对照组发电量分别增加 1.53%、2.04%和 2.29%。

图 10 为喷射器在不同出口背压工况下的释能功率。根据推动透平做功的气体来源，CAES 系统释能过程中的总功率，可以分为工作气体带动的基础功率和引射乏气引起的增效功率。由图 9、图 10 可见：在释能开始阶段，储气罐满载压力为 12.0 MPa 时，在 3 种不同喷射器出口背压下，系统的基础功率相同；在不同背压下，引射进入透平二次做功的乏气流量不同，喷射器的增效功率也存在差异。出口背压为 9.0 MPa 时增效功率最大，为 132.85 kW；出口背压为 7.0 MPa 时增效功率最小，为 72.52 kW。随着释能过程的持续进行，储气罐压力降低，工作气体流量减少，在透平组效率不变的工况下，机组的基础功率逐渐下降，对于出口背压较低的工况，由于配备的储气罐容积更小，基础功率下降更快；而由喷射器引射的低压乏气流量随工作气体流量的减小呈现先增大后减小的趋势，故增效功率呈现先升高后降低的趋势。出口背压为 9.0、8.0、7.0 MPa 时，CAES 系统分别在释能持续 2.0、4.0、3.0 h 时达到增效功率极值 132.86、108.03、73.34 kW。在设计释能时长 4.0 h 结束时，当出口背压为 9.0、8.0 MPa 时，透平总功率分别为 10.50、9.90 MW，均满足额定功率 10.0 MW 的需求；而当出口背压为 7.0 MPa 时，透平总功率仅为 8.46 MW，远小于设计功率。

图 11 为 CAES 系统在释能结束后储气罐内的无效能量和系统释能过程的能量转化率。由图 11 可见，当背压为 9.0 MPa 时，储罐内剩余压能达 102.35×10^9 J，而系统在储存和释放能量的转化效率仅为 4.7%。随着喷射器出口背压的升高，储气罐内的剩余压能逐渐增大，而系统的能量转化效率逐渐降低。综合系统释能时段内，总的发电量和系统的能量利用效率，当喷射器出口背压为 8.0 MPa 时，透平在满足 4.0 h 连续释能，10.0 MW 功率输出的同时，兼顾系统运行效率，储能、释能的转化为率 16.67%，具有最高的经济效益。

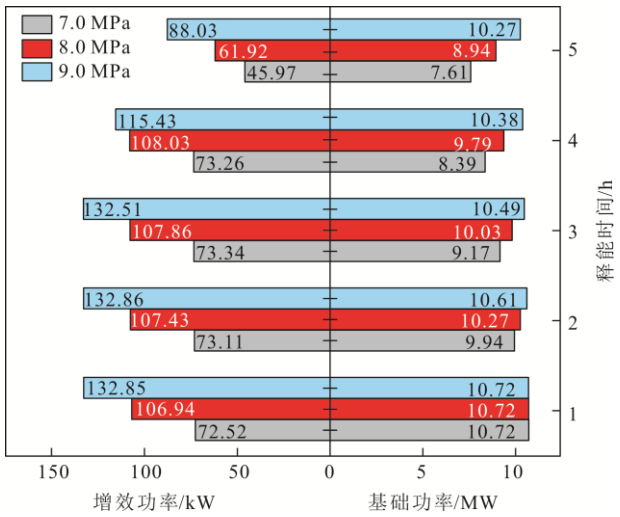


图 10 喷射器不同出口背压下的释能功率

Fig.10 The energy release power of the ejectors at different outlet back pressures

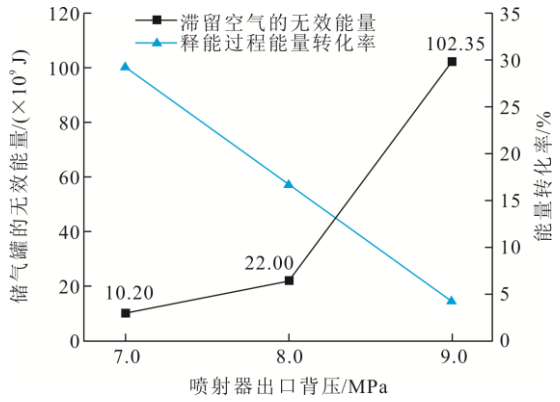


图 11 储气罐的无效能量和释能能量转化率

Fig.11 The ineffective energy of the air receiver and the system energy conversion rate

4 结 论

本文以在建的 10.0 MW CAES 示范系统为研究对象，通过响应面法分析了可调喷射器的引射性能，并评估了不同运行工况下系统的发电量、能量存储与释放效率，为提升 CAES 系统运行效益提供了理论依据，主要结论如下。

1）喷射器的引射性能对工作气体与引射乏气的压力变化较为敏感，而受出口背压影响相对较小。以引射比为优化目标时，在工作气体压力为 10.00~11.75 MPa、引射乏气压力为 5.60 MPa 的工况下，喷射器可获得最佳引射性能。

2）出口背压通过改变喷射器内部流场结构影响其能量转化效率与运行区间宽度。在较高背压条

件下，喷射器运行效率提升，但高效压力区间收窄。当出口背压 8.0 MPa 时，喷射器在 12.00~10.00 MPa 范围内保持高效运行，最大能量利用率达 10.46%。

3）随着喷射器出口背压的提高，所需储气罐容积增大，系统发电量相应增加，但无效能量损失也显著上升，导致释能环节能效降低。在出口背压为 8.0 MPa 的系统中，配置 2.2×10^3 m^3 储气罐即可满足发电需求，系统能量转化率为 16.67%，发电量达 5.01×10^4 kW·h，相较于无喷射器的系统提升 2.04%，综合发电效益最优。

综上，针对 10.0 MW 级 CAES 系统，在喷射器出口背压为 8.0 MPa，并匹配适当储气容积的运行条件下，系统可实现发电效益的最大化。

［参 考 文 献］

［1］ 赵星源, 谢芳毅, 刘乙学, 等. 压气储能电站智能建造体系及其关键技术[J]. 发电技术, 2024, 45(5): 899-909.
ZHAO Xingyuan, XIE Fangyi, LIU Yixue, et al. Intelligent construction system and key technology for compressed air energy storage power plant[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(5): 899-909.

［2］ 李欣, 韦古强, 强同波, 等. 压缩空气储能与氢能耦合系统的研究进展[J/OL]. 发电技术, 2025: 1-17. [2025-12-24]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1405.TK.20250108. 1659.006.html.
LI Xin, WEI Guqiang, QIANG Tongbo, et al. Research progress on the coupling system of compressed air energy storage and hydrogen energy[J/OL]. Power Generation Technology: 1-17. [2025-12-24]. https://kns. cnki.net/kcms/detail/33.1405.TK.20250108. 1659.006. html.

［3］ 辛传凤, 王文权, 陈伟, 等. 压缩空气储能技术多维度应用与发展路径分析[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(9): 3636-3647.
XIN Chuanfeng, WANG Wenquan, CHEN Wei, et al. Multi-dimensional application and development paths of compressed air energy storage technology[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(9): 3636-3647.

［4］ 刘权, 钟剑, 陈晨, 等. 基于压缩空气储能的电-热综合能源系统两阶段弹性提升策略[J]. 电网技术, 2026, 50(1):14-27.
LIU Quan, ZHONG Jian, CHEN Chen, et al. Two-stage resilience enhancement strategy for integrated electricity-heat energy system based on compressed air energy storage[J]. Power System Technology, 2026, 50(1):14-27.

［5］ PANDA A, MISHRA U, AVISO K B. Optimizing hybrid power systems with compressed air energy storage[J]. Energy, 2020, 205: 118014.

［6］ 卢绪祥, 刘雨菲, 徐航, 等. 压缩空气储能系统动态特性仿真分析[J]. 动力工程学报, 2025, 45(7): 1045-1051.
LU Xuxiang, LIU Yufei, XU Hang, et al. Simulation analysis of dynamic characteristics of compressed air energy storage system[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2025, 45(7): 1045-1051.

［7］ LI R X, TAO R, YAO E R, et al. Decoupling heat-pressure potential energy of compressed air energy storage system: using near-isothermal compressing and thermal energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 63: 107071.

［8］ 张遥, 张依伦, 苏传奇, 等. 恒压压缩空气储能技术研究 [J]. 热力发电, 2024, 53(9): 19-28.
ZHANG Yao, ZHANG Yilun, SU Chuanqi, et al. Study on constant pressure compressed air energy storage technology[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(9): 19-28.

［9］ 张萱, 陈来军, 崔森, 等. 先进绝热压缩空气储能系统宽工况运行可行域分析[J]. 电网技术, 2025, 49(12): 5147-5155.
ZHANG Xuan, CHEN Laijun, CUI Sen, et al. Feasible region analysis of advanced adiabatic compressed air energy storage system under wide operation condition[J]. Power System Technology, 2025, 49(12): 5147-5155.

［10］ 周升辉, 何阳, 陈海生, 等. 喷射器强化压缩空气储能充能过程[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(5): 1503-1513.
ZHOU Shenghui, HE Yang, CHEN Haisheng, et al. Using an ejector to intensify the charging process of a compressed air energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1503-1513.

［11］ 李建林, 邸文峰, 李雅欣, 等. 长时储能技术及典型案例分析[J]. 热力发电, 2023, 52(11): 85-94.
LI Jianlin, DI Wenfeng, LI Yaxin, et al. Analysis of long-term energy storage technologies and typical case studies[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(11): 85-94.

［12］ 宗智仁, 郭欢, 朱轶林, 等. 增压-再循环压缩空气储能系统热力学特性分析[J/OL]. 中国电机工程学报, 2025: 1-14. [2025-12-24]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.250559.11.2107.tm.20250905.1132.004.
ZONG Zhiren, GUO Huan, ZHU Yilin, et al. Thermodynamic characteristics aalysis of the pressurization recirculation compressed air energy storage system[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2025, 1-14. [2025-12-24]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013. pcsee.250559.11.2107.tm.20250905.1132.004.

［13］ 方凯跃, 毛维斌, 操正清, 等. 基于伴随优化和正交实验的蒸汽喷射器结构优化[J]. 真空科学与技术学报, 2025, 45(5): 414-420.
FANG Kaiyue, MAO Weibin, CAO Zhengqing, et al. Optimization of steam ejector structure based on adjoint optimization and orthogonal experiment[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2025, 45(5): 414-420.

［14］ 韩宇, 王晓冬, 李鹏飞, 等. 激波结构对喷射器工作特性的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2024, 45(9): 1309-1316.
HAN Yu, WANG Xiaodong, LI Pengfei, et al. Influence of shock wave structure on the ejector's operating characteristics[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2024, 45(9): 1309-1316.

［15］ 王林, 李少强, 谈莹莹, 等. 混合工质喷射器变工况性能研究[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(5): 1300-1307.
WANG Lin, LI Shaoqiang, TAN Yingying, et al. Study on the performance of zeotropic mixture ejector under variable operating conditions[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, 45(5): 1300-1307.

［16］ 徐煜, 王辉涛, 余伟, 等. 基于 CFD 数值模拟下的蒸汽喷射器性能预测[J]. 热科学与技术, 2023, 22(2): 149-156.
XU Yu, WANG Huitao, YU Wei, et al. Performance prediction of steam ejector based on CFD numerical simulation[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2023, 22(2): 149-156.

［17］ 郭祚刚, 刘通, 徐敏, 等. 新型喷射增效压缩空气储能

系统性能[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(6): 1877-1887.
GUO Zuogang, LIU Tong, XU Min, et al. Theoretical analysis of a novel ejector augmented compressed air energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(6): 1877-1887.

[18] 胡泽灵, 郝俊红, 巨陈治, 等. 基于标准热阻法的压缩空气储能系统整体建模及能-佣分析[J/OL]. 发电技术, 2025, 1-11. [2025-12-24]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1405.TK.20250530.1630.006.html.
HU Zeling, HAO Junhong, JU Chenzhi, et al. Comprehensive modeling and energy-exergy analysis of compressed air energy storage systems based on standard thermal resistance method[J/OL]. Power Generation Technology, 2025, 1-11. [2025-12-24]. https://kns.cnki.net/kcms/de tail/33.1405.TK.20250530.1630.006.html.

[19] 张卫国, 吴闯, 罗方, 等. 300 MW 级绝热压缩空气储能系统性能分析与优化研究[J/OL]. 热力发电, 2025, 1-9. [2025-12-24]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1111.tm.20250801.1643.002.html.
ZHANG Weiguo, WU Chuang, LUO Fang, et al. Performance analysis and optimization of 300 MW compressed air energy storage system[J/OL]. Thermal Power Generation, 2025, 1-9. [2025-12-24]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1111.tm.20250801.1643.002.html.

[20] HAMIDREZA M, WANG X L, MICHAEL N. Dynamic analysis of a low-temperature adiabatic compressed air energy storage system[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276: 124323.

[21] 陈泽兵, 李文, 朱阳历, 等. 压缩空气储能系统膨胀机的旁路控制策略[J]. 工程热物理学报, 2025, 46(7): 2091-2105.
CHEN Zebing, LI Wen, ZHU Yangli, et al. Bypass control strategies for the compressed air energy storage system expander[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2025, 46(7): 2091-2105.

[22] 李盼, 杨晨, 陈雯, 等. 压缩空气储能系统动态特性及其调节系统[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2295-2305.
LI Pan, YANG Chen, CHEN Wen, et al. Dynamic characteristics of compressed air energy storage system and the regulation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2295-2305.

[23] 赵峰, 杨明成, 郝宁, 等. 压缩空气储能系统透平负荷控制策略的研究与仿真实现[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(9): 3500-3508.
ZHAO Feng, YANG Mingcheng, HAO Ning, et al. Research and simulation implementation of turbine load control strategies in compressed air energy storage systems[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(9): 3500-3508.

[24] 葛士宇, 史汪洋, 徐钢, 等. 压缩空气储能辅助太阳能电站调峰性能分析[J]. 热力发电, 2025, 54(9): 35-45.
GE Shiyu, SHI Wangyang, XU Gang, et al. Performance analysis of peak load balancing for compressed air energy storage assisted solar power station[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(9): 35-45.

（责任编辑　杜亚勤）