

DOI: 10.19666/j.rlfed.202401002

等温压缩空气储能技术研究综述

何青¹, 时金凤¹, 贾明祥²

(1.华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206;

2.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

[摘要] 压缩空气储能是一种新型的大型物理储能技术, 具有很好的发展前景。介绍了等温压缩空气储能的基本原理, 以及关键设备与相关技术的原理及发展现状; 对液体活塞、水泵和水轮机进行分析和总结; 对等温压缩空气储能的基本原理进行了归纳和说明; 分析了现有等温压缩空气储能技术研究进展情况, 对系统中液体活塞技术以及水泵和水轮机技术进行分析和总结; 对已有的压缩空气储能电站数据进行汇总分析。在此基础上, 对等温压缩空气储能技术未来发展方向进行了展望, 可为等温压缩空气储能系统中动力设备的选用以及示范项目的推进提供一定的数据参考。

[关键词] 等温压缩空气储能; 液体活塞; 水泵; 水轮机; 可逆式水泵

[引用本文格式] 何青, 时金凤, 贾明祥. 等温压缩空气储能技术研究综述[J]. 热力发电, 2024, 53(9): 10-18. HE Qing, SHI Jinfeng, JIA Mingxiang. A review on technology research of isothermal compressed air energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(9): 10-18.

A review on technology research of isothermal compressed air energy storage system

HE Qing¹, SHI Jinfeng¹, JIA Mingxiang²

(1.School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2.Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: The compressed air energy storage is a large-scale physical energy storage technology and a highly promising new type of energy storage technology. This paper summarizes the basic principles of isothermal compressed air energy storage, and introduces the principles and current development status of key equipment and related technologies. It provides an analysis and summary of liquid pistons, pumps and turbines. Moreover, it reviews the basic principles of isothermal compressed air energy storage, and analyzes the existing research progress on isothermal compressed air energy storage technology. An analysis and summary are presented for liquid piston technology, as well as pump and turbine technology in the system. The data of existing compressed air energy storage power stations are summarized and analyzed. The data of existing compressed air energy storage power stations are summarized and analyzed. On this basis, the future development direction of isothermal compressed air energy storage technology is prospected, which provides a certain data reference for the selection of power equipment in isothermal compressed air energy storage system and the promotion of demonstration projects.

Key words: isothermal compressed air energy storage; liquid piston; water pump; water turbine; reversible pump

“双碳”目标对现有的能源体系产生了一定影响, 要求现有传统能源体系向清洁、低碳方向转型升级。为进一步规避间歇性能源对电网的冲击,

提高电力系统的经济性与安全性, 增强电网运行的可靠性, 储能技术的发展必不可少^[1]。

目前, 储能技术主要有物理储能技术、化学储

收稿日期: 2024-01-19 网络首发日期: 2024-03-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB0905902)

Supported by: National Key Research and Development Program of China (2020YFB0905902)

第一作者简介: 何青(1962), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为压缩空气储能技术, heq@ncepu.edu.cn.

通信作者简介: 时金凤(1999), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为压缩空气储能技术, 18813002056@163.com.

能技术、电磁储能技术等。大规模物理储能技术中的抽水蓄能技术已较为成熟，应用广泛，但其对资源的依赖性强，对地形、水源的要求高。因此，压缩空气储能（compressed air energy storage, CAES）在大规模物理储能技术上具有更大的发展潜力，其具体工作原理是：在用电低谷时期，将多余的电能转化成空气内能储存；在用电高峰时期，生产的电量无法满足用电需求时，利用存储的高压气体对外膨胀做功，将气体内能转化成电能，以弥补用电缺口。CAES 可以对光电、风电等低品位的多余电能进行储存，起到聚纳新型能源、调节电力系统中的峰谷负荷、升级能源结构的作用。

早期补燃式 CAES 系统还额外依赖化石燃料，即在系统释能过程中空气温度较低，无法使透平膨胀机高效率运行发电，因此需要将化石燃料的内能转化成热能，从而使空气温度升高。而化石燃料的燃烧不仅增加了储能电站的运行成本，也增加了二氧化碳排放量。目前，学者们主要研究的 CAES 系统大多采用非补燃式，利用空气压缩过程中产生的热量，来替代补燃式压缩空气储能系统中化石燃料的热量。当前建成并成功投运的 CAES 电站主要类型见表 1^[2]。目前，国内在建和拟建的 CAES 系统大多采用先进绝热技术，先进绝热 CAES 电站中，设计工况效率接近 70%^[2-3]，而等温压缩空气储能（isothermal CAES, I-CAES）的理论效率则更高。

表 1 CAES 技术类型及示范项目
Tab.1 Types of compressed air energy storage and demonstration projects

技术类型	结构特点	典型示范项目	规模	效率/%
传统压缩空气储能	基于燃气轮机技术，配置燃烧室	德国 Huntorf 项目	290 MW×4 h	44
		美国 McIntosh 项目	110 MW×26 h	53
先进绝热压缩空气储能	增加蓄热装置，取消燃烧室	江苏金坛国家试验示范项目	60 MW×5 h	>60
		山东肥城 10 MW 示范项目	10 MW×6 h	>60
		湖北应城 300 MW 项目	300 MW×5 h	~70
液态压缩空气储能	将空气压缩至低温储罐，配置液化装置	英国 Highview Power 公司	5 MW×5 h	60

与其他 CAES 技术相比，I-CAES 技术的特点在于，空气压缩过程和空气膨胀过程均能够保持空气温度恒定。目前，关于 I-CAES 技术的研究主要围绕增强压缩过程中的气液换热效果开展。从设备角度研究，Coney 等人^[4]开发了一种新型往复式空气压缩机，在压缩过程中喷射大量水滴，从而实现

对空气的等温压缩。在往复式压缩机的基础上，除了液滴喷雾的方式，还有学者研究了液体活塞、添加多孔金属板、添加水泡沫等方式。Van 等人^[5]提出了液体活塞的概念，建立了相应的理论模型，将液体活塞的压缩效率显著提高至 83%。Zhang 等人^[6]还提出了将多孔插片（开孔金属泡沫结构）用于液态活塞，改善了传热表面积，实验证明液态活塞换热效果得到了有效提高。Qin 等人^[7]提出了将液体活塞与液滴喷雾相结合的方法。美国 LightSail Energy 公司主要研究液滴喷雾技术，拥有多项专利^[8]。Sustain X 公司也使用水泡沫技术来促进 I-CAES 系统的热交换，拥有相关技术专利^[9]。

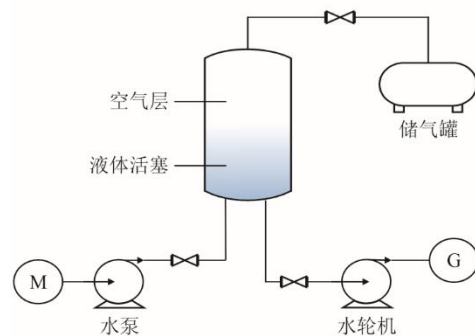
本文介绍了 I-CAES 系统的基本原理，对系统关键设备的技术原理、发展现状和类型进行了介绍和总结，并对压缩空气储能系统示范项目的经济性等数据进行了汇总分析。

1 I-CAES 系统原理

CAES 技术具有储能容量大、储能周期长、安全性能高等优点，能够满足大规模、长时间的储能需求。目前，我国正在积极进行 CAES 系统的研究和试点示范工作。CAES 系统有着多种不同的技术形式，其中 I-CAES 理想储能效率最高。

1.1 I-CAES 原理

I-CAES 系统的结构组成如图 1a)所示，主要由水泵、水轮机/发电机、液体活塞和储气罐等组成。I-CAES 系统工作原理如图 1b)所示：储能时，水泵驱动液体活塞将空气压缩成高压空气存入储气罐中；释能时，高压空气推动液体活塞，从而带动水轮机发电。系统通过液体活塞技术对压缩过程和膨胀过程进行温度控制。液体活塞的工质一般选用比热容大的液体（例如水或者油）与空气侧换热，通过气液间的换热使得空气在压缩和膨胀过程中无限接近等温过程。



a) 系统结构组成

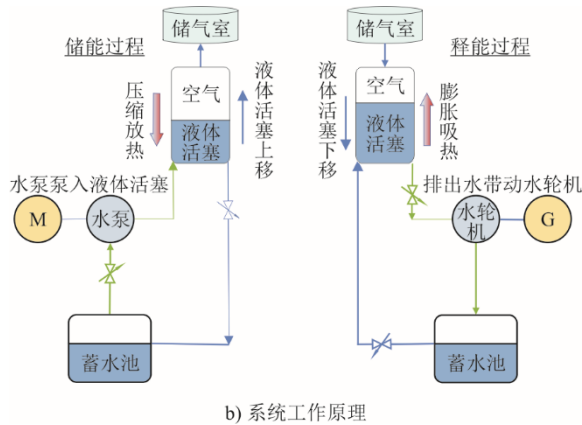


图 1 I-CAES 系统结构组成及工作原理

Fig.1 Structural composition and working principle of the I-CAES system

就设备而言，等温压缩空气过程避免了因压缩温度过高对设备造成热损害，提高了设备的安全性。而在实际研究中，压缩和膨胀过程的完全等温是很难实现的。目前，国内外学者研究了多种实现 I-CAES 系统控温的可行方案，例如利用液体活塞、液滴喷淋、嵌入多孔介质板等。

从热力循环的角度分析，I-CAES 系统的压缩、膨胀过程为等温循环，理论上不会有能量损失。等温压缩循环过程与其他热力循环过程 p - V 图如图 2 所示， AB 和 CD 表示绝热压缩与膨胀过程， AE 和 CF 表示多变的压缩与膨胀过程， AC 和 CA 表示等温压缩与膨胀过程。由图 2 可以看出，等温压缩膨胀循环过程耗功最少。

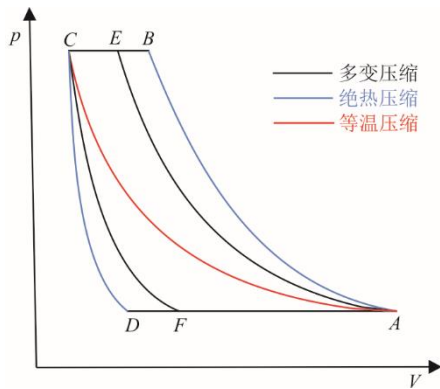


图 2 不同热力循环 p - V 图

Fig.2 p - V diagram of various thermodynamic cycles

热力循环过程压缩耗功量为^[10]:

$$W_{in} = (p_e - p_0)V_e - \int_{V_0}^{V_e} (p_e - p_0)dV \quad (1)$$

式中: W_{in} 为压缩耗功量, J; p_e 为压缩后的空气压力, Pa; p_0 为压力容器内空气的初始压力, Pa; V_0

为初始空气体积, m^3 ; V_e 为压缩后的空气体积, m^3 。

循环过程膨胀做功量为:

$$W_{out} = (p_f - p_0)V_e - \int_{V_e}^{V_f} (p - p_0)dV \quad (2)$$

式中: W_{out} 为膨胀做功量, J; p_f 、 p_0 分别为膨胀前、后空气压力, Pa; V_e 为膨胀初始过程空气体积, m^3 ; V_f 为膨胀后的空气体积, m^3 。

由以上公式分析可得: $ABCD$ 和 $AECF$ 围成的封闭图形面积为单个热力循环过程造成的热量损失。而等温循环理论上不会产生热量损失。

1.2 I-CAES 技术研究进展

CAES 技术起源于 20 世纪中期,以燃气发电为基础。由于传统 CAES 技术热量耗失较大,储能效率不高,未得到推广。20 世纪 90 年代,为了提高储能效率,学者们开始研究能够将压缩热回收利用的储能技术,但该技术在大型设计建造方面,经济性不高,因此并未得到商业化应用。21 世纪初期,提出以 I-CAES 技术为代表的新技术,通过液体活塞等控温技术控制气体温度变化,提高储能效率。

目前,对于 I-CAES 技术的理论研究主要围绕压缩过程中的强化换热展开。在强化气液传热技术方面,目前的 I-CAES 系统多采用液滴喷雾技术和液体活塞技术来保证空气在压缩过程中温度恒定。在 I-CAES 系统结构方面,目前存在多种形式的系统结构。例如傅昊等^[11]通过在 I-CAES 系统中增加虚拟抽蓄子系统以维持压力的恒定。李丞宸等^[12]提出了一种利用高温高压蒸汽保证 I-CAES 系统放电稳定性的改进方法。Chen 等人^[13]提出了一种双液体活塞式的 I-CAES 系统,使空气的等温压缩储能和膨胀释能过程具有高效连续性。

为了验证 I-CAES 技术的可实施性和创新性研究的正确性,学者们开展了一系列试验。在设备类型上,Heidari 等人^[14]设计、分析、制造和实验测试了一种新型翅片往复式压缩机,其特点是传热面积和系数增加。在控温技术方面,Neu 等人^[15]认为延长压缩位移和减缓活塞速度可能有利于实现空气在压缩过程中维持近等温状态,通过二维粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术测量在极低冲程缸径比下压缩室内空气的流动过程。

2 I-CAES 系统关键设备技术

I-CAES 系统结构简单,因此每一个关键设备的高效运行都会对系统产生较大的影响。I-CAES 技术特点是空气在压缩和膨胀过程中温度接近恒

定,液体活塞就是保证温度恒定的关键设备。水泵水轮机是系统中主要的水力机械能量转换装置,与液体活塞配合实现能量形式的转化。对于提高系统整体效率来说,选择合适的液体活塞技术类型和水泵水轮机类型至关重要。

2.1 液体活塞技术

液体活塞的工作原理是在一个压缩室内,利用液体(通常是水)增加或减少气体的压力。液体活塞相较于固体活塞,运动更平稳,密封性更好。在空气压缩和膨胀过程中,通过控制液体流量及速度,更加准确地控制系统运行。更重要的是,I-CAES系统液体活塞能够加强等温压缩空气过程中的气液换热,是维持空气压缩和膨胀过程近等温状态的关键手段。空气在压缩过程生成的热量和膨胀过程吸收的热量,会与液体活塞中比热容较大的液体进行热交换,使得空气的温度维持在近等温状态。

Van 等人^[5]建立了液体活塞压缩过程相应的理论模型,发现液体活塞压缩过程的能量转换效率与相同尺寸的常规活塞相比提高了13%。Zhao 等人^[16]提出了基于可凝性气体R41的双液压蓄能器配置准等温压缩气体储能并进行性能分析。Kermani 等人^[17]使用离散-差分法解析了液体活塞腔体壁面换热过程的时变特性。

目前,针对液体活塞强化换热技术的研究有喷雾技术、多孔介质、水泡沫技术、蜂窝、空心球体、液体活塞柱几何形状。

喷雾技术通过向液体活塞内射入液滴来实现强化换热。Qin 等人^[7]采用喷雾技术降低压缩空气的温升,结果显示近等温压缩过程空气的温升仅为40℃,比相同压比下绝热压缩的空气温升低220℃。许未晴等^[18]提出将微米级水雾喷入液体活塞中,吸收压缩产生的热量,以达到压缩过程恒温,通过实验对气体的压缩情况及其体积和温度的变化特性进行了分析。Odukumaiya 等人^[19]采用数值模拟方法研究了喷雾式冷却 I-CAES 系统储气装置内温度的变化,结果表明系统的能量运行效率可达82%。虞启辉等^[20]研究了喷雾时,其与换热过程的耦合关系,运用数值模拟的方法分析喷雾启闭时刻对系统总效率的影响,以及不同压缩比和活塞速度与喷雾启闭时刻的关系。Gao 等人^[21]建立了采用液滴喷射法的 I-CAES 系统热力学模型,研究了喷雾角度,给出了液滴质量随旋转角度和空气质量的计算公式,研究了气液质量比和转速对等温压缩/膨胀

效率、等温过程、往返效率和能量密度等热力学性能的影响。

多孔介质技术通过向液体活塞中插入多孔介质板来提高气液换热效果。Zhou 等人^[22]对连续多孔介质板进行了介绍,为评估多孔介质的影响建立了传热的数学模型和流体流动压降模型。使用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)分析方法,深入研究了多孔介质在各种流动条件下对流体流动的影响。Yan 等人^[23]进行了一项实验研究,以测量多孔介质对改善液体活塞、压缩/膨胀器等性能的影响。Patil 等人^[24]为了提高压缩效率,在液体活塞式压缩机实验中测试了一种使用金属丝网的新型传热增强技术,实验测试了铝和铜2种材料。Khaljani 等人^[25]设计在液体活塞式压缩机中嵌入铝平行板,实验测试不同高度嵌板传热效果。Patil 等人^[26]提出一种新型的等温压缩内部增强换热方法,即利用一种水性泡沫形式提高气-液换热系数,同时利用液体活塞式压缩机进行实验研究,综合考虑了压缩室内含水泡沫的体积、产生泡沫的空气流量以及各种泡沫发生器的设计理念。

空心球体的概念如图3所示^[27],是在气液界面上增加一层浮动球体,吸收气体中的热量并将其传递给水。在压缩或膨胀过程中,这些空心球体沿着界面移动,在不增加太多压缩功的情况下,提高换热效果。Ramakrishnan 等人^[27]提出将空心球体插入液体活塞,并对3种不同材质的小空心球进行了实验和模拟计算对比,证明空心球有助于增强液体活塞换热效果。

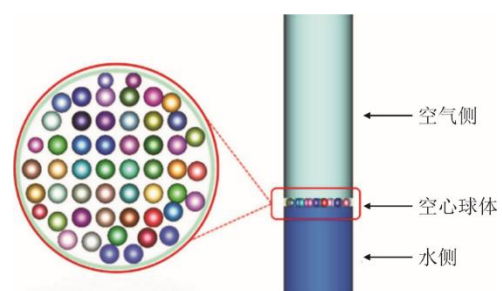


图3 液体活塞中空球体
Fig.3 Hollow spheres for LP

传统液体活塞是截面不变的圆柱形。为了优化液体活塞换热效果,Zhang 等人^[28]研究了沿轴向截面变化对压缩换热的影响,液体活塞几何形状如图4所示^[28]。

针对 I-CAES 系统储能和释能过程实现近等温状态的技术需求,液体活塞技术被视为较有前景的

技术路线之一。液体活塞的运用，能够有效传递压力和能量，同时减少能量转换过程中的热损失。表 2 汇总了当前液体活塞的 6 种强化换热技术^[29]，可以对比不同强化换热技术在不同规模、不同环境条件下的换热效果，寻找系统效率最高的技术类型。

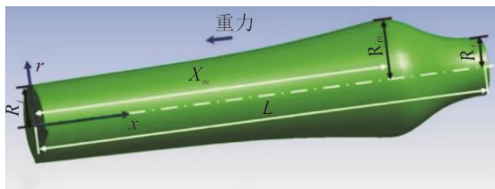


图 4 变截面液体活塞

Fig.4 Liquid piston with variable cross-section

表 2 强化液体活塞换热技术

Tab.2 The enhanced liquid piston heat exchange technologies

名称	原理	换热效率/%
液滴喷雾	将高压水滴喷射到 LP 柱的顶部，可以利用水滴射线注入空气侧的方式来强化传热	89.0~95.0
多孔介质	将多孔插入物作为气体和液体之间传热的良好介质	95.5
蜂窝	利用许多又长又细的管子代替大活塞柱，液体流经这些管子增加换热	64.0
空心球体	在气液界面处增加 1 层浮动球体，吸收空气/水中的热量并将其传递给水/空气	
液体活塞柱几何形状	采用变截面圆柱换热	69.5
水泡沫	从活塞底部产生泡沫（含水添加剂），上升到气液界面，增加气液接触面积	91.5

2.2 水泵技术

水泵是 I-CAES 系统中的重要设备之一，当系统准备储存能量时，水泵向液体活塞中泵入水来压缩空气，通过控制水泵的流量及流速来实现空气的高压和等温。因此，水泵需要具备响应迅速、控制精准、效率高等特点。通常从水泵设计与制造、水泵运行过程的优化分析、水泵的运行监测和故障诊断 3 个方面，实现 I-CAES 系统中水泵的高效运行。

1) 水泵设计与制造 我国水泵的设计和制造主要采用 3 种方式进行，即联合设计、引进国外技术、自主研发设计。水泵的基础设计技术与制造技术相对较为成熟，对于水泵的设计制造，大多集中在与运行过程优化相关的方面。

2) 水泵运行过程的优化分析 由于流量负荷的变化，水泵在运行过程中效率会有所不同。水泵运行优化相关技术已经较为成熟。梁卫兵等^[30]在研

究超临界 600 MW 机组锅炉给水泵关断点扬程过高问题时，利用了计算流体动力学（CFD）方法。张澄东等^[31]搭建了给水泵入口处流场的三维模型，利用 ANSYS12.0 平台的 CFX 模块进行模拟计算，对水泵的水力性能进行优化。唐卫卫^[32]详细说明了离心泵优化设计以及 CFD 三维数值模拟的演进过程，搭建了一个多目标、多变量的数学优化模型，利用 MATLAB 软件的遗传算法对离心泵的几何参数进行优化计算，在 Fluent 软件中对优化后的离心泵几何参数进行三维流场的模拟仿真。

3) 水泵的运行监测、故障诊断和维修保养 I-CAES 系统中水泵的运行状况也值得关注。在水泵运行过程需要对各项数据进行监控，包含噪声大小、振动频率、温度改变等。马文超等^[33]研究了基于 LabVIEW 的水泵监测软件，实现了水泵系统多源传感器信息实时监测。

除了优化设计、优化运行和故障监测，合理选择水泵型号也很重要。在系统设计之初，根据具体工作要求、流量负荷、扬程等参数，选择合适的泵型能够最大限度地提高系统效率和运行稳定性。不同规模的储能电站需要不同类型、不同规格的水泵来满足其特定的流量和水头需求。基于不同类型水泵的工作原理和应用特性，对其进行分类介绍具体见表 3^[34]。

表 3 水泵类型及适用范围
Tab.3 Water pump types and their applicability

类型	适用范围	流量范围/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	扬程/m	效率	特点
离心泵	黏度较低的 各种介质（水）	1.6~ 30 000	10~ 2 600	0.5~0.8	结构简单， 易于维修
混流泵	扬程比轴流泵高， 流量比轴流泵小、 比离心泵大		5~30		较离心泵设计 结构复杂
轴流泵	适用于大流量、 低扬程，黏度较低 的介质	145~ 245 000	<10	0.7~0.9	振动水平高
旋涡泵	适用于小流量、 较高压力的低黏度 清洁介质	0.4~10.0	8~150	0.25~0.50	效率较低
往复泵	适用于高压、 小流量的清洁介质 （含悬浮液或要求 无泄漏可用隔膜）	0~600	0.2~100	0.70~0.85	维护复杂
转子泵	适用于中低压力， 中小流量，尤其适 用于黏度高的介质	1~600	0.2~50.0	0.6~0.8	适用于低 扬程

2.3 水轮机技术

水轮机是 I-CAES 系统运行过程中的重要能量转换设备之一。当系统准备释放能量时，高压气体

膨胀做功排水,水带动水轮机做功发电。

我国水轮机技术起步较晚,但最近20多年来通过引进与吸收国外技术发展迅速。目前,对于水轮机的设计主要采用CFD技术。孙少楠等^[35]联合CFD技术和建筑信息模型(built information modeling, BIM)技术,利用Fluent软件对水轮机全流道流场进行了仿真模拟,模拟结果显示:不同工况下蜗壳BIM模型流场压差较小,速度分布均匀合理,水力性能良好,验证了BIM与CFD联合应用于水力机械设计的可行性。对于水轮机的蜗壳设计,刘奕炜等^[36]提出一种适用于水轮机蜗壳的快速设计方法,综合利用Dynamo for Revit和Advance Steel软件各自的优点,可直接生成蜗壳钢结构加工所需要的各类视图及数据驱动文件。

I-CAES系统要求水轮机高效、稳定运行,因此水轮机运行过程的优化设计十分重要。杨峰等^[37]在针对混流式水轮发电机组噪声较大,叶片区域破坏严重等问题进行了设备优化设计,增加了活动导叶数量,更换尾水管,利用CFD技术计算出水轮机组改造后的额定工况效率为93%。

目前,水轮机设备较完善,有多种结构类型和组装形式,如何在扬程和负荷变化的情况下选择平均效率高的水轮机,同时能保证机组运行稳定可靠是当前亟待解决的问题。要使水轮机尺寸小,就应尽可能选用比转速高的水轮机,比转速高的水轮机转速高,转轮直径小。按照结构特点可将水轮机简单划分为斜流式水轮机、轴流式水轮机、混流式水轮机、贯流式水轮机等,具体见表4^[38]。

表4 水轮机类型
Tab.4 Types of water turbines

型式	结构特点	适用扬程/m	技术特点
切击式	射流对进口平面呈切线	40~2 000	喷嘴射流沿转轮圆周切线方向冲击斗叶,应用较为广泛
水斗式	射流与进口平面斜射角22°~25°	20~300	应用水头范围广泛;结构简单,运行可靠;效率高
斜击式	进入一段叶道付出70%~80%的动能后,再进入另一部分叶道	<60	结构简单;偏离设计工况时效率会急剧下降
双击式	径向流入、轴向流出转轮	50~700	高效率区范围宽;因需有转动叶片的操作机构,结构较复杂
混流式	转轮叶片不可调或停机可调	30~80	与轴流式相比装设较多的叶片,提高了应用水头;结构较复杂
轴流式	转轮叶片与导叶协调调节	40~200	效率高;过流能力大,比转速高;结构紧凑;制造要求高,运行检修不便

2.4 可逆式水泵水轮机

可逆式水泵水轮机将水泵和水轮机合为一体,既可作水泵使用,也可作水轮机使用。水泵和水轮机作为水力转换装置,其工作原理相同,能量转换方向相反。涡轮正向转动时,设备作为水泵功能使用,涡轮反向转动时则作为水轮机使用。

储能领域中抽水蓄能电站就应用了可逆式水泵水轮机设备。I-CAES系统在储能过程中使用水泵,在释能过程中使用水轮机。由于I-CAES电站能够灵活储存能量,因此储能和释能过程可以在不同地点进行。若I-CAES储能电站的储能和释能过程在同一地点进行,则可采用可逆式水泵水轮机。

可逆式水泵水轮机类型包括混流可逆式、斜流可逆式、贯流可逆式,适应不同扬程,具有结构简单,造价低,建造工程量小等特点。在4~600 m扬程范围内,1970年以后建成的所有抽水蓄能电站,以及目前正在建设的所有抽水蓄能电站,全部采用可逆式水泵水轮机。

近几年对可逆式水泵水轮机的研究取得了显著成果。樊玉林^[39]通过CFD算法对可逆式水泵水轮机内部流场进行研究,并进行多目标优化,对三维全流道进行了计算模型的建立,模型计算通过ANSYS CFX15.0完成,并对不同运行工况下转轮的工作性能进行预估和流场分析。Prasasti等人^[40]研究了一种专门为低扬程运行设计的新型变速、可逆式水泵水轮机,模拟计算结果显示:在7.1~21.0 m扬程内,可逆式水泵水轮机平均效率在水轮机模式下为88%,在水泵模式下为91%。廖忠稳等^[41]对1 200 MW抽水蓄能电站的可逆式水泵水轮机进行选型设计和设计工况效率计算,可逆式水泵水轮机的设计工况效率最高均约92%。邓小华^[42]对国内大型抽水蓄能电站可逆式水泵水轮机的选型总结得出:水泵工况效率平均为92%,水轮机工况效率平均为90%。

3 I-CAES 系统效率及成本分析

I-CAES系统仍处于实验研发阶段,实际示范项目尚未开展。当前国内外已建成多个压缩空气储能系统的示范电站,汇总分析已建成的压缩空气储能电站效率、成本等,可为I-CAES示范项目的建立提供数据参考。

3.1 I-CAES 电站效率分析

近两年国内外开展了较多的CAES电站项目,有不少项目正处在可研阶段和建设。表5汇总了

已经建成并成功投运的国内外 CAES 电站项目, 具体数据见表 5^[43]。

表 5 国内外 CAES 示范项目

Tab.5 Demonstration projects of CAES at home and abroad

项目地点	技术类型	容量	效率/%	储能密度/ (kW·h·m ⁻³)
德国 Huntorf	补燃	290 MW×4 h	44.0	1.87
美国 McIntosh	补燃	110 MW×26 h	53.0	5.31
瑞士圣哥达基线隧道	绝热	0.7 MW	63.0~74.0	
加拿大戈德里奇	绝热	1.75 MW	>60.0	
河北张家口	绝热	100 MW×4 h	70.4	4.00
江苏金坛	绝热	60 MW×5 h		1.36
安徽芜湖	绝热	0.5 MW	33.0	
贵州毕节	绝热	10 MW×4 h	60.2	
江苏同里	液态	0.5 MW		
英国 Highview Power	液态	5 MW×3 h	60.0	

抽水蓄能电站和 I-CAES 系统都是使用水泵水轮机作为能量转换装置, 将抽水蓄能电站和 I-CAES 系统中的水泵水轮机效率进行对比, 具体数据见表 6。由表 6 可知, 对于较大装机规模的抽水蓄能电站, 水泵水轮机效率较高。I-CAES 系统的灵活度较高, 由于装机规模较为小巧, 其水泵水轮机的效率尚未得到有效提升, 未来可以通过多个液体活塞并联的方式提高系统容量, 从而提高效率。

表 6 I-CAES 系统与抽水蓄能电站水泵水轮机效率对比
Tab.6 Comparison of efficiency between the I-CAES system and PSHS's pumped turbine

指标	抽水蓄能电站	I-CAES 系统
水泵效率	0.90~0.94	0.85
水轮机效率	0.87~0.92	0.82
建设规模/MW	100~2 000	10~100
建设周期/a	5~8	1~2

3.2 I-CAES 电站经济性分析

对于近些年建成的压缩空气储能电站示范项目的经济性进行分析, 具体数据见表 7^[44]。通过对比数据可知, 装机容量越大的电站, 系统经济性越好。

表 7 CAES 系统成本分析
Tab.7 Cost analysis for the CAES

装机容量/ (MW)/(MW·h)	技术类型	单位造价/ (元·kW ⁻¹)	单位造价/ (元·(kW·h) ⁻¹)
10/60	绝热	10 000	1 700
60/300、100/400	绝热	>8 000	>7 400
300/1 500	盐穴绝热	6 000	1 200
300/1 500	人工硐室绝热	8 000	1 300
1 200	抽水蓄能	6 000~8 000	600~1 200

3.3 I-CAES 电站应用场景

I-CAES 电站在电力系统中的应用场景可以分

为 3 部分: 电源侧、电网侧、用户侧。

1) 电源侧即发电侧, 主要是新能源发电具有调节速度慢, 发电时间和发电量不固定的特点。I-CAES 电站可以辅助新能源发电, 在调峰调频方面, 保证并网运行稳定。

2) I-CAES 电站运用在电网侧的主要目的是稳运行。具体用途包括黑启动、缓解输配电阻塞及延缓输配电设备投资、调峰调频、提高供电可靠性等。当电网中出现输电线路故障时, I-CAES 电站能够短时供电, 为检修电路争取时间。

3) 用户侧 I-CAES 电站的主要用途是降低用户的用电成本以及提高用户侧的用电可靠性。当用户侧需要大量用电且存在分时电价时, I-CAES 电站就具有很好的经济性, 能够显著降低用户用电成本。当供电系统出现故障时, 储能电站的存在能够帮助用户应对短时的停电危机, 提高用户侧用电可靠性。当用户侧需要大量用电且存在两部制电价时, I-CAES 电站能够将基于变压器容量收费的基本电价转化为较为便宜的基于最大需量收费的基本电价^[45], 从而降低用户用电成本。

4 主要问题及解决思路

4.1 主要问题

I-CAES 系统具有结构简单、理论效率高等优点。目前, I-CAES 系统仍处在研究开发阶段, 因此可能会遇到以下问题。

1) 原理方面 I-CAES 系统的显著特点是空气压缩和膨胀过程温度接近于恒定。从热力循环角度来看, 无限接近于等温压缩和膨胀, 可以有效提高循环效率。在此基础上对等温循环过程需做出改进优化, 例如系统中液体活塞数量、系统控制方法等。

2) 强化换热方面 液体活塞的技术优化是从强化气液换热角度出发, 对液体活塞内部结构进行改造。改造后的液体活塞能否准确控制启停。优化后的液体活塞内部结构通常较为复杂, 储能释能过程中的数据监测是否准确。

3) 设备选择方面 目前, 对于 I-CAES 系统如何选用适合的液体活塞、水泵和水轮机都尚未定论。不同类型的设备对 I-CAES 系统的储能效率存在较大影响。在系统仿真计算过程中如何对水泵、水轮机类型做出区分, 以及在计算过程中涉及到努赛特数、雷诺数的选用, 相关经验公式如何确定。

4.2 解决思路

要加快对 I-CAES 技术的研究和推进,需从以下几个方面入手。

1) 对不同结构类型的系统循环过程进行仿真模拟计算,对比储能效率。对不同结构类型的 I-CAES 系统进行热力学和经济性分析,对系统结构进行优化。

2) 对改造后的液体活塞进行仿真实验,对比实验数据与仿真数据是否一致。实验分为不同量级进行,对比不同量级的数据吻合情况,分析大规模系统中液体活塞是否能够高效运行。加强对液体活塞中强化换热技术的探索,分析并实验验证获得最佳强化传热技术。目前多种换热技术仍处于实验阶段,尚未进行示范应用和验证,因此要分析不同技术的优缺点、经济性以及安全性。

3) 搭建系统仿真模型,通过仿真计算确定各部件的参数及运行过程,可以先选择额定工作范围较广的水泵与水轮机,再通过仿真模型对系统参数进行设计与优化,保证实际运行过程中系统参数处于水泵与水轮机的额定范围内;为了保证不同工况下系统的正常运行,可以选用多级的水泵水轮机,保证不同工况下系统的正常高效运行。分析水泵和水轮机对 I-CAES 系统运行效率的影响情况。针对 I-CAES 系统制定相关的选型标准和运行规程。

[参考文献]

- [1] 龚一平,王晨晖,修晓青,等. 大规模储能技术及多功能应用研究综述[J]. 供用电, 2023, 40(2): 68-77.
GONG Yiping, WANG Chenhui, XIU Xiaoqing, et al. Overview of large-scale energy storage technology and multi-function application[J]. Distribution and Utilization, 2023, 40(2): 68-77.
- [2] 郭晓通,宋海鑫. 张北县百兆瓦先进压缩空气储能国家示范项目空气变身绿色“充电宝”[N]. 2023-01-18.
GUO Xiaotong, SONG Haixin. The national demonstration project of advanced 100-megawatt compressed air energy storage in Zhangbei County transforms air into a green “power bank”[N]. 2023-01-18.
- [3] 孙晓霞,桂中华,张新敬,等. 压缩空气储能与可再生能源耦合研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(23): 9224-9242.
SUN Xiaoxia, GUI Zhonghua, ZHANG Xinjing, et al. Research progress on compressed air energy storage coupled with renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(23): 9224-9242.
- [4] CONEY M W, STEPHENSON P, MALMGREN A, et al. Development of a reciprocating compressor using water injection to achieve quasi-isothermal compression[C]. 16th International Compressor Engineering Conference. West Lafayette: Purdue University, 2002: 1-10.
- [5] VAN DE VEN J D, LI P Y. Liquid piston gas compression[J]. Applied Energy, 2009, 86(10): 2183-2191.
- [6] ZHANG C, YAN B, WIEBERDINK J, et al. Thermal analysis of a compressor for application to compressed air energy storage[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73(2): 1402-1411.
- [7] QIN C, LOTH E. Liquid piston compression efficiency with droplet heat transfer[J]. Applied Energy, 2014, 114: 539-550.
- [8] LightSail Energy[EB/OL]. (2012-02-27) [2022-03-20]. <https://craft.co/lightsail-energy>.
- [9] SustainX-Your Business| Our Future[EB/OL]. (2022-02-14) [2022-03-20]. <https://sustainx.dk/>.
- [10] 何青,王珂. 等温压缩空气储能技术及其研究进展[J]. 热力发电, 2022, 51(8): 11-19.
HE Qing, WANG Ke. Research progress of isothermal compressed air energy storage technology[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(8): 11-19.
- [11] 傅昊. 液控压缩空气储能系统原理及运行策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019: 45-56.
FU Hao. Research on principle and operation strategy of hydraulic compressed air energy storage system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019: 45-56.
- [12] 李丞宸,李宇峰,张严,等. 一种新型蒸汽恒压抽水压缩空气储能系统及其热力学分析[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(6): 84-91.
LI Chengchen, LI Yufeng, ZHANG Yan, et al. Novel steam constant-pressure pumped hydro with compressed air energy storage system and thermodynamic analysis[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(6): 84-91.
- [13] CHEN H, PENG Y H, WANG Y L, et al. Thermodynamic analysis of an open type isothermal compressed air energy storage system based on hydraulic pump/turbine and spray cooling[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 204: 112293.
- [14] HEIDARI M, MORTAZAVI M, RUFER A. Design, modeling and experimental validation of a novel finned reciprocating compressor for isothermal compressed air energy storage applications[J]. Energy, 2017, 140: 1252-1266.
- [15] NEU T, SUBRENAT A. Experimental investigation of internal air flow during slow piston compression into isothermal compressed air energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 38: 102532.
- [16] ZHAO P, LAI Y, ZHANG S, et al. Near constant discharge performance analysis of a dual accumulator configuration quasi-isothermal compressed gas energy storage based on condensable gas[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 32: 101945.
- [17] KERMANI N A, ROKNI M. Heat transfer analysis of liquid piston compressor for hydrogen applications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(35): 11522-11529.
- [18] 许未晴,贾冠伟,年炫炜,等. 用于压缩空气储能的微米级水雾冷却等温压缩实验研究[J]. 液压与气动, 2017(12): 1-9.
XU Weiqing, JIA Guanwei, NIAN Xuanwei, et al. Experimental research on micron-sized water spray cooled quasi-isothermal compression for compressed air energy storage[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2017(12): 1-9.
- [19] ODUKOMAIYA A, ABU-HEIBA A, GLUESENKAMP K R, et al. Thermal analysis of near-isothermal compressed gas energy storage system[J]. Applied Energy, 2016, 179: 948-960.
- [20] 虞启辉,赵敏,孙国鑫,等. 喷雾时刻对等温压缩空气储能系统性能的影响[J]. 液压与气动, 2023, 47(6): 19-28.
YU Qihui, ZHAO Min, SUN Guoxin, et al. Influence of spray time on the performance of isothermal compressed air energy storage system[J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics, 2023, 47(6): 19-28.

- [21] GAO Z, ZHANG X, LI X, et al. Thermodynamic analysis of isothermal compressed air energy storage system with droplets injection[J]. *Energy*, 2023, 284: 129304.
- [22] ZHOU H, DONG P, ZHAO S, et al. Interrupted plate porous media design for ionic liquid-type liquid piston hydrogen compressor and analysis of the effect on compression efficiency[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 51: 104410.
- [23] YAN B, WIEBERDINK J, SHIRAZI F, et al. Experimental study of heat transfer enhancement in a liquid piston compressor/expander using porous media inserts[J]. *Applied Energy*, 2015, 154: 40-50.
- [24] PATIL V C, RO P I. Experimental study of heat transfer enhancement in liquid piston compressor using aqueous foam[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 164: 114441.
- [25] KHALJANI M, HARRISON J, SURPLUS D, et al. A combined experimental and modelling investigation of an overground compressed-air energy storage system with a reversible liquid-piston gas compressor/expander[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 245: 114536.
- [26] PATIL V C, ACHARYA P, RO P I. Experimental investigation of water spray injection in liquid piston for near-isothermal compression[J]. *Applied Energy*, 2020, 259: 114182.
- [27] RAMAKRISHNAN K R, RO P I, PATIL V C. Temperature abatement using hollow spheres in liquid piston compressor for ocean compressed air energy storage system[C]. *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*. Monterey: IEEE, 2016: 1-5.
- [28] ZHANG C, LI P Y, VAN DE VEN J D, et al. Design analysis of a liquid-piston compression chamber with application to compressed air energy storage[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 101: 704-709.
- [29] GOUDA E M, FAN Y, BENAOUICHA M, et al. Review on liquid piston technology for compressed air energy storage [J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 43: 103111.
- [30] 梁卫兵, 吴宝鑫, 胡永海. 600 MW 超临界锅炉给水泵叶轮出口宽度优化设计[J]. *机床与液压*, 2013, 41(19): 66-69.
LIANG Weibing, WU Baoxin, HU Yonghai. Optimization of impeller outlet width for 600 MW supercritical boiler feed pump[J]. *Machine Tool and Hydraulics*, 2013, 41(19): 66-69.
- [31] 张澄东, 胡永海. 锅炉给水泵进水端内流场分析及导流段优化研究[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(5): 1296-1300.
ZHANG Chengdong, HU Yonghai. Allowable fuzzy reliability of yield and burst strength for spherical vessels[J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(5): 1296-1300.
- [32] 唐卫卫. 离心水泵的优化设计及其仿真[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2011: 23-58.
TANG Weiwei. Optimization design and numerical simulation of the centrifugal pump[D]. Xianyang: Northwest Agriculture and Forestry University, 2011: 23-58.
- [33] 马文超. 基于 LabVIEW 的水泵异常智能检测系统设计研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023: 35-63.
MA Wenchao. Design and research of intelligent anomaly detection system for water pump based on LabVIEW[D]. Xi'an: Polytechnic University, 2023: 35-63.
- [34] 陈汇龙. 水泵原理, 运行维护与泵站管理[M]. 1 版. 北京: 化学工业出版社, 2004: 10-50.
CHEN Huilong. Principles of water pumps, operation and maintenance, and pump station management[M]. 1st ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 10-50.
- [35] 孙少楠, 刘肖杰, 肖佳华, 等. 联合 BIM 和 CFD 的混流式水轮机蜗壳水力设计[J]. *人民长江*, 2023, 54(9): 144-150.
SUN Shaonan, LIU Xiaojie, XIAO Jiahua, et al. Hydraulic design of Francis turbine volute based on BIM and CFD[J]. *Yangtze River*, 2023, 54(9): 144-150.
- [36] 刘奕炜, 陈铭轩, 牛志伟, 等. 基于 Dynamo 和 Advance Steel 的水轮机蜗壳快速设计方法[J]. *水力发电*, 2023, 49(9): 62-68.
LIU Yiwei, CHEN Mingxuan, NIU Zhiwei, et al. Rapid design method of spiral case of hydro turbine based on Dynamo and Advance Steel[J]. *Water Power*, 2023, 49(9): 62-68.
- [37] 杨峰, 王旭. 基于 CFD 的混流式水轮机内部流道优化设计研究[J]. *制造业自动化*, 2022, 44(2): 191-193.
YANG Feng, WANG Xu. Research of optimal design for flow passage components of turbine based CFD[J]. *Manufacturing Automation*, 2022, 44(2): 191-193.
- [38] 于波, 肖惠民. 水轮机原理与运行[M]. 1 版. 北京: 中国电力出版社, 2008: 11-40.
YU Bo, XIAO Huimin. Principles and operation of hydraulic turbines[M]. 1st ed. Beijing: China Electric Power Press, 2008: 11-40.
- [39] 樊玉林, 祝宝山, 胡赞熬, 等. 可逆式水泵水轮机多目标优化设计及流动研究[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(10): 108-112.
FAN Yulin, ZHU Baoshan, HU Zan'ao, et al. Multi-objective optimization design and internal flow research of pump-turbine[J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(10): 108-112.
- [40] PRASASTI E B, AOUAD M, JOSEPH M, et al. Optimization of pumped hydro energy storage design and operation for offshore low-head application and grid stabilization[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 191: 114122.
- [41] 廖忠稳, 马伟栋, 杨永信. 广东野猪山抽水蓄能电站机组选型设计[J]. *云南水力发电*, 2023, 39(12): 376-382.
LIAO Zhongwen, MA Weidong, YANG Yongxin. Selection and design of units for Guangdong Yezhushan Pumped Storage Power Station[J]. *Yunnan Water Power*, 2023, 39(12): 376-382.
- [42] 邓小华. 国内大型抽水蓄能电站水轮机选型研究[J]. *四川水力发电*, 2023, 42(5): 78-82.
DENG Xiaohua. Study on the selection of hydraulic turbine for domestic large-scale pumped storage power stations[J]. *Sichuan Water Power*, 2023, 42(5): 78-82.
- [43] 吴全, 孙春良, 郭海涛, 等. 压缩气体储能技术经济特点和发展方向探析[J]. *油气与新能源*, 2023, 35(6): 90-98.
WU Quan, SUN Chunliang, GUO Haitao, et al. Analyzing the technological and financial features and prospects for compressed gas energy storage technologies[J]. *Petroleum and New Energy*, 2023, 35(6): 90-98.
- [44] 张玮灵, 古含, 章超, 等. 压缩空气储能技术经济特点及发展趋势[J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(4): 1295-1301.
ZHANG Weiling, GU Han, ZHANG Chao, et al. Technical economic characteristics and development trends of compressed air energy storage[J]. *Energy Science and Technology*, 2023, 12(4): 1295-1301.
- [45] 郭彬刚, 马溪原, 雷金勇, 等. 压缩空气储能示范进展及商业应用场景综述[J]. *南方能源建设*, 2019, 6(3): 17-26.
GUO Zuogang, MA Xiyuan, LEI Jinyong, et al. Review on demonstration progress and commercial application scenarios of compressed air energy storage system[J]. *Southern Energy Construction*, 2019, 6(3): 17-26.

(责任编辑 杨嘉蕾)