

先进抽水压缩空气复合储能技术

王焕然, 席光, 李瑞雄, 姚尔人, 孙中国, 王志恒, 邹瀚森, 令兰宁, 贺新, 张宇飞

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 储能技术的创新突破成为带动全球能源格局革命性、颠覆性调整的必经之路,是实现“碳中和、碳达峰”目标的重要举措。为此,西安交通大学“先进物理储能技术”研究团队创新性地发明了新型抽水压缩空气复合储能技术。该技术采用空气和水作为混合工作介质,利用水力机械设备和空气透平作为系统的复合做功设备,实现储能介质高效等温压缩/膨胀。相比于传统压缩空气储能技术,新型气液复合空气储能技术具有响应快、效率高、投资成本低等优点。团队通过10余年的攻关研究,完成了关键设备与储能系统的性能表征、时域特性研究、流体机械关键共性技术集中攻关、空气储能技术全寿命周期性能评估软件的研发及应用,研究成果可为气液复合压缩空气储能技术的规模化推广应用提供坚实的理论与数据支撑。

关键词: 压缩空气储能技术;近等温压缩;抽水压缩空气复合储能技术;高效运行

中图分类号: TK02 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202405001 **文章编号:** 0253-987X(2024)05-0001-09

A Study on the Combined Pumped-Hydro and Compressed Air Energy Storage System

WANG Huanran, XI Guang, LI Ruixiong, YAO Erren, SUN Zhongguo,

WANG Zhiheng, ZOU Hansen, LING Lanning, HE Xin, ZHANG Yufei

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The innovation breakthrough in energy storage technology has become a crucial driver for transformative and disruptive changes in the global energy landscape. It is an important measure to achieve the strategic goals of “carbon peak and carbon neutrality”. In this regard, the research team on “Advanced Physical Energy Storage Technology” at Xi'an Jiaotong University has creatively proposed a new type of combined pumped-hydro and compressed air energy storage system. This technology applies air and water as the intermediate working mediums and conducts air turbine and hydraulic machinery as the power output equipment to achieve high-efficiency isothermal compression and expansion of the energy storage medium. Compared to traditional compressed air energy storage technology, the novel combined pumped-hydro and compressed air energy storage system features fast response, high efficiency, low investment cost, and so forth. Throughout the course of more than ten years of research and development, the team has completed the research on the performance and time-domain characteristics of key equipment and energy storage systems, achieved a significant breakthrough in key generic technologies of fluid machinery, and finished the development and application of life cycle assessment software for

收稿日期: 2023-12-24。 作者简介: 王焕然(1965—),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52106052)。

网络出版时间: 2024-01-23

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20240122.1202.002>

compressed air energy storage system, providing solid theoretical and data support for the large-scale promotion and application of gas-liquid hybrid compressed air energy storage technology.

Keywords: compressed air energy storage; near-isothermal compression; combined pumped-hydro and compressed air energy storage system; efficient operation

1 研究背景

能源事关我国国家安全和经济社会发展。随着我国化石燃料的逐渐枯竭,近年来,我国新能源发电量飞速增长。目前,我国风电与光伏发电装机容量均已位居世界第一,但是随之产生的“弃风/光”等能源浪费问题极为严峻^[1-2]。“储能+可再生能源”作为提高新能源利用率,减少能源浪费的重要手段,是实现“碳达峰、碳中和”目标的核心关键^[3],因此大规模电力储能技术已经成为我国的战略需求之一^[4]。

压缩空气储能技术是解决间歇式新能源并网和电网调峰的重要技术之一,自20世纪被提出以来,该技术因其可靠性高、寿命长和储能容量大的优势而受到广泛关注^[5]。根据压缩过程产生的压缩热处理方式不同^[6],将现有压缩空气储能技术划分为补燃型压缩空气储能^[7]、绝热型压缩空气储能^[8]以及等温型压缩空气储能^[9]。

补燃型压缩空气储能技术将压缩过程产生的压缩热直接排向环境,而释能过程需要额外提供热源以补充热量。目前,世界上仅有两座大型商业补燃型压缩空气储能电厂,分别是1978年在德国建造的Huntorf电厂和1991年在美国建造的McIntosh电厂^[10]。

绝热型压缩空气储能技术通过将压缩热回收储存用于加热释能时膨胀机入口气体,避免了消耗化石燃料,同时也提高了系统的运行效率^[11]。近年来,中国科学院工程热物理研究所和清华大学等科研单位针对该技术进行了深入研究。中国科学院工程热物理研究所在山东省肥城市、河北省张家口市等地建设了压缩空气储能调峰电站和国家示范工程,清华大学研究团队在安徽省芜湖市、江苏省常州市金坛区等地建设了压缩空气储能示范项目和国家示范工程^[12]。但是,由于绝热压缩空气储能需要配置蓄热系统替代补燃型压缩空气储能中的燃烧室,从而导致系统建设和运行成本提高,同时降低了系统的动态响应速度^[13-14]。

等温型压缩空气储能技术利用液体比热容大的特点,为压缩空气过程提供温度近似恒定的运行环境^[15]。目前,主要通过液体活塞和喷淋等手段增加水气工质之间的热量交换,从而降低空气压缩过程

产生的热损失,最终实现高效压缩空气的目的^[16]。

2 系统研究

2.1 无坝抽水蓄能技术

西安交通大学发明的无坝抽水蓄能技术,是一种融合了抽水蓄能和压缩空气储能优势的先进新型复合储能技术,兼具两种储能技术的优势,可以实现大容量、长时间和低成本的电力储存,为电能大规模存储提供了全新解决方案^[17-19]。其储能原理为:通过设置如图1所示的水气共容舱,在其内部储存压缩空气,将压力容器与水泵连接,通过水泵向压力容器内注水,相当于在水泵所连接的下游储水池和压力容器之间建造了一个虚拟水坝,通过控制压力容器内空气压力可以改变虚拟水坝上下游的落差。例如,当压力容器内空气压力为1 MPa时,相当于所构建的虚拟水坝底部高度是100 m。

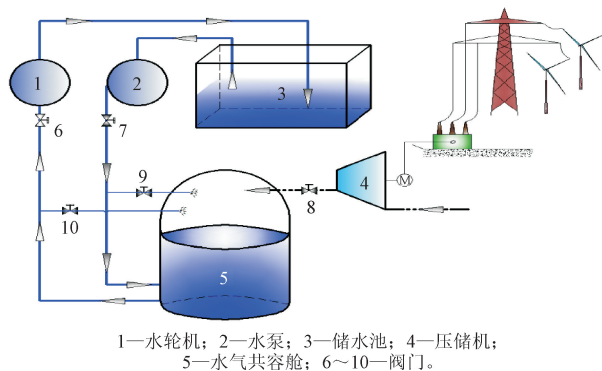


图1 无坝抽水蓄能技术示意图

Fig. 1 The schematic diagram of pumped hydro combined with compressed air energy storage system

无坝抽水蓄能系统在储能过程中,水泵利用富余或可再生能源电力,通过水泵将水从储水池泵到压力容器内,实现电能到空气压力势能的转换;在用电高峰期,压力容器内的高压空气推动水进入水轮机向储水池释放,将储存在空气中的势能转化为电能,从而实现了电能的高效储存。

为实现系统在设计工况下运行,如图2所示,通过向无坝抽水蓄能系统中增设恒压调控模块,在储能过程和释能过程中分别减少和增加压力容器内空气的质量,实现水泵和水轮机的高效恒压运行。

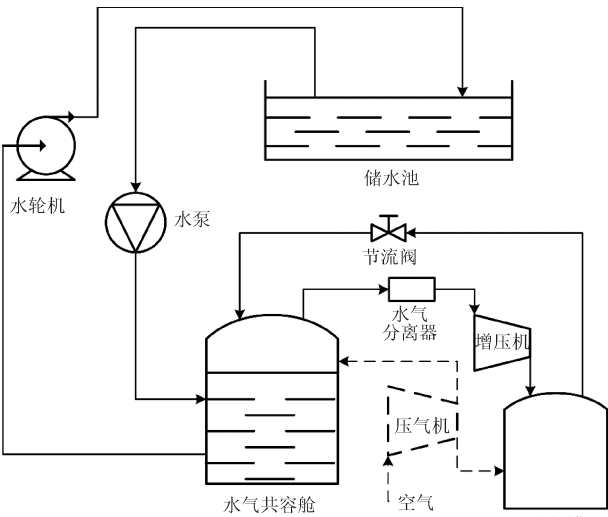


图 2 恒压型无坝抽水蓄能系统示意图

Fig. 2 The schematic diagram of constant-pressure pumped hydro combined with compressed air energy storage system

2.2 近等温压缩空气储能技术

压缩热的高效利用是提升压缩空气储能技术热力学性能的关键,为此课题组首次提出由耦合绝热压缩和近等温压缩的复合型压缩空气储能技术^[20-22]。所提系统包括预压缩子系统、等温压缩子系统、绝热膨胀子系统和热能储存子系统,如图 3 所示。在储能过程中,空气经压缩机绝热预压缩,产生的压缩热由热交换器收集并由储热罐储存,空气温度被冷却到环境温度后,进入近等温压缩子系统进一步加压,直到达到其预设压力;在释能过程,压缩空气流经储热罐,储热材料将储存的热能传递给压缩空气,以提高进入绝热膨胀子系统的空气温度,空气在膨胀机中绝热膨胀对外做功,实现稳定的电能输出。综合热力学分析,当储气罐的储气压力为 11 MPa 时,该系统的最高能效为 72.47%。

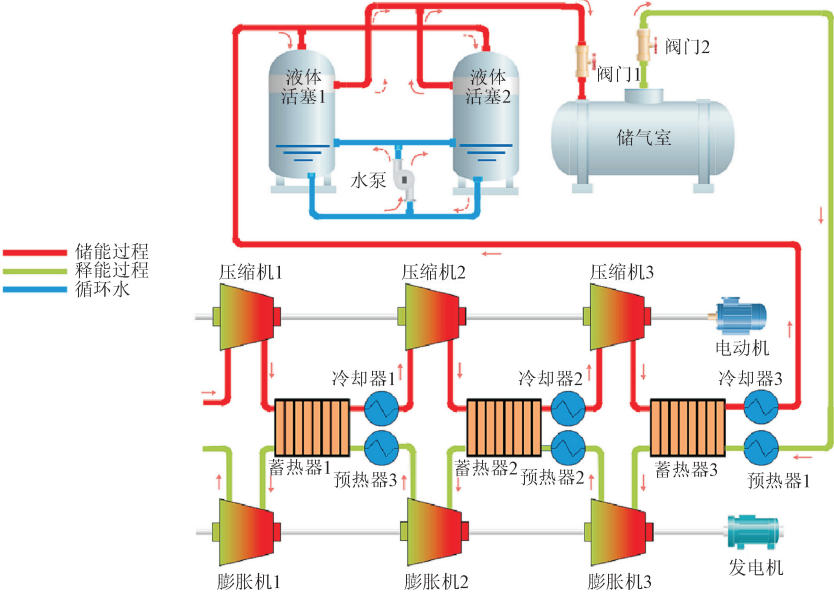


图 3 近等温压缩空气储能系统示意图

Fig. 3 The schematic diagram of near-isothermal compressed air energy storage system

2.3 抽水压缩空气复合储能技术

响应速度是评价储能技术的关键指标之一。为提升压缩空气储能技术的响应速度,团队提出一种先进抽水压缩空气复合储能技术^[23],如图 4 所示。该系统主要包括:压气机机组、透平机机组、储热器、换热器、水轮机、水泵、储气洞穴、水气共容舱以及储水池等设备。系统的储能过程分为两个阶段:第一阶段利用可再生能源驱动水泵工作,将水气共容舱内的空气充入储气装置中;第二阶段改用可再生能源驱动压气机机组将空气压缩至高压状态,实现

电能到压力势能的转换。系统的释能过程也分为两个阶段:第一个释能阶段系统的发电设备为水轮机组;第二个释能阶段的发电设备为空气透平机机组。在第一阶段,储存于储气洞穴内的高压空气经过节流阀后,进入水气共容舱并推动水气共容舱内的水进入水轮机,水轮机在额定工况下工作并对外供电;在第二阶段,储气洞穴内和水气共容舱内的高压空气经过节流阀后,与储热器释放的高温载热介质进行热量交换,高压空气升温后进入空气透平机对外做功输出电能。

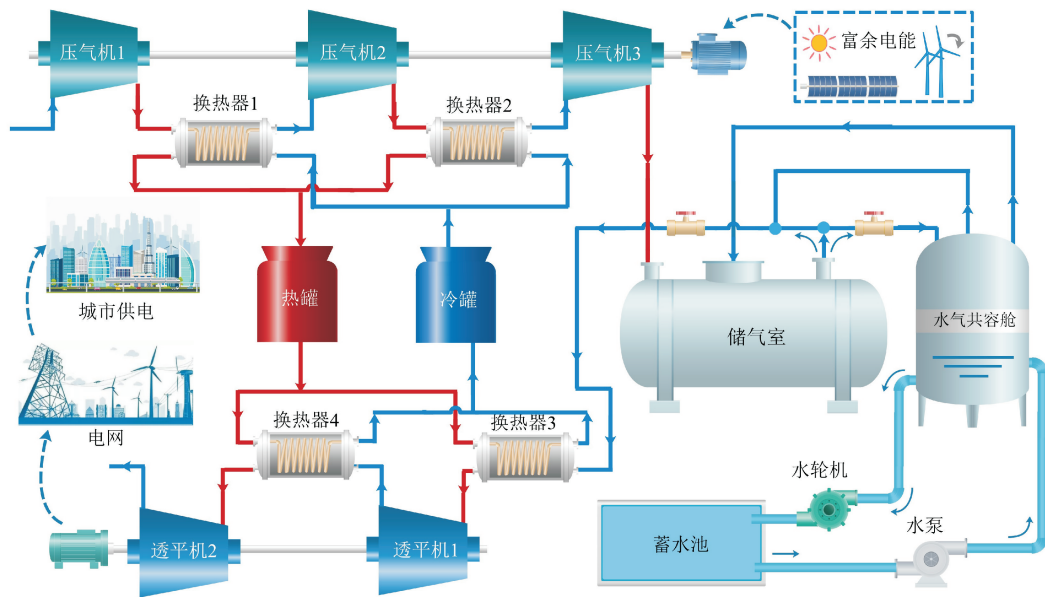


图4 抽水压缩空气复合储能系统示意图

Fig. 4 The schematic diagram of combined pumped-hydro and compressed air energy storage system

3 关键技术攻关情况

3.1 关键储能装备方面

团队已攻克液体活塞高效近等温压缩空气控制技术难题和高压环境中受迫波动界面的传质控制技术难题,形成了具有国际先进水平的研究成果,为先进抽水压缩空气复合储能系统的高效安全运行提供了技术支撑。

近等温压缩空气是实现空气储能系统热压全解耦功能的核心技术。团队成员以抽水压缩空气复合储能系统中液体活塞压缩空气储能过程为攻关对象,通过建立液体活塞腔内界面行为与气相近等温运行轨迹动态耦合的精确数理模型,开展了从局部受迫波动界面热质运移到全局气液共容体系能量传输耦合的机理研究,解析储能过程的热质传递关键环节,明确了界面行为对气体近等温压缩轨迹的作用机理;进而剖析设备储能过程能量传输流耦合与反馈效应,形成了能够快速精准评估液体活塞近等温压缩空气储能过程效能的归一化方法,通过全局性分析液体活塞腔体储能过程各能量传输流的演变轨迹,实现从局部机理研究到系统性能探索的跨越,并最终建立了液体活塞腔体储能过程的运行调控策略与设计体系。图5为液体活塞腔体储能过程热质传递示意图。研究为液体活塞关键能量转换设备的状态评估、优化设计和有效管理提供准确、可靠的依据,为压缩空气储能系统的低能耗高效运行优化与

推广应用提供理论支撑。

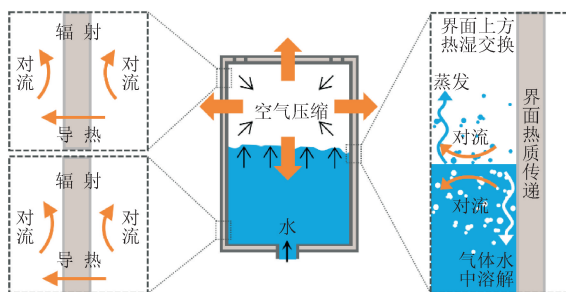


图5 液体活塞腔体储能过程热质传递示意图

Fig. 5 The schematic diagram of heat and mass transfer within the liquid piston during charging process

团队针对液体活塞腔体内复杂气液流动现象,率先发展了一种基于界面捕捉技术的气液两相流数值模型,推导出了气液两相流动的单一场控制方程,研究了气泡在静止水体中生成、上升和溃灭的动力学行为特性,获得了不同压力下水中气泡的形成、运动及溃灭条件。在此基础上,搭建了气泡行为实验研究平台,通过对水气工质不同热力状态的气泡形态拍摄分析,确立了气液界面动力学经验方程。液体活塞腔体内水中气泡行为见图6。

针对抽水压缩空气复合储能系统中高压环境的水-气溶解问题,团队完成了水气共容腔体内水-气分界面流动特性的研究,指出水的体积分数在0.05~0.95之间时水气相之间会出现较大的掺混现象。通过计算这一区域的体积,可以直观地反映出水气相之间掺混的剧烈程度。

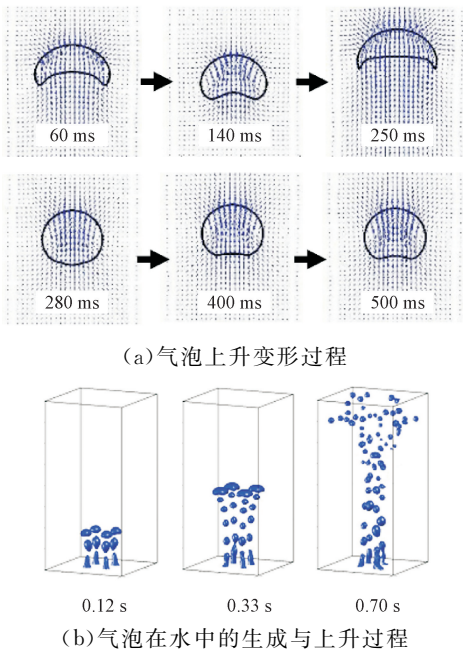


图 6 液体活塞腔体内水中气泡行为

Fig. 6 The bubble behavior in the water within the liquid piston

团队先后主持完成了国家“863 计划”先进能源领域目标导向类课题“叶片式流体机械先进节能技术及应用”,顺利完成了国家“863 计划”重点项目子课题“风电大规模压缩空气储能技术与工程示范”整体方案的设计规划;制定了 2 MW 压缩空气储能试验电站的设计技术方案及试验大纲。在抽水压缩空气储能系统及其设备研究方面,完成了系统的性能表征与时域特性研究、流体机械关键共性技术集中攻关、大型流体机械整机非定常流动并行计算软件的研发及应用。

3.2 抽水压缩空气复合储能系统设计方面

抽水压缩空气复合储能系统突破了压缩空气储能系统的设计与集成控制技术,实现了压缩空气储能系统效能的精准快速评估,从根本上解决了大规模压缩空气储能系统电-电转换效率低、发电成本高、响应速度慢的瓶颈难题。

团队瞄准压缩空气储能系统运行过程能质传递与转换的关键问题,通过建立系统性的多能流运输数理模型,阐明了系统内多场作用下异质能量的耦合特征,进而揭示了从关键部件到整体系统的跨尺度能量传输机理,建立了压缩空气储能系统运行过程的能量传递与转化理论体系,如图 7 所示。图中, W_{pump} 、 W_{HP} 、 Q_{WH} 、 W_{comp} 、 Q_{TES} 、 W_{tur} 、 W_{KC} 分别为水泵耗功、热泵耗功、余热热量、压缩机耗功、蓄热量、膨胀机做功、卡琳娜循环输出功。该体系为压缩空气储能系统在宽广工况下的高效运行奠定了理论基础。

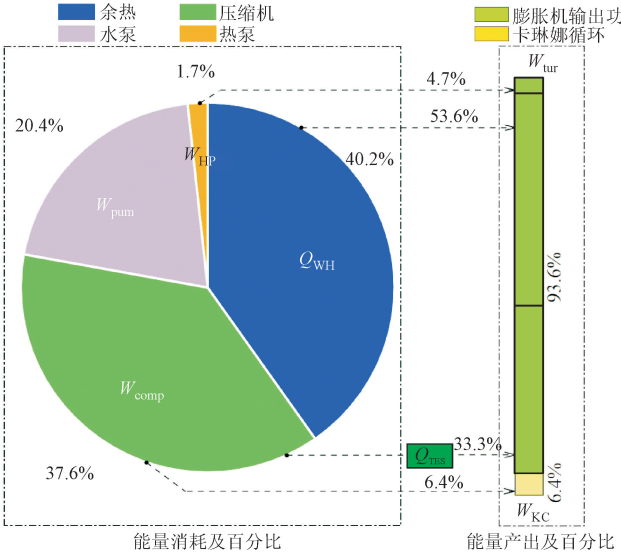


图 7 The energy distribution of key components in the combined pumped-hydro and compressed air energy storage system

考虑到绝热压缩与近等温压缩空气储能的独特优势,将近等温压缩与绝热压缩方式进行合理融合提出了抽水压缩空气复合储能系统,形成了基于“热压解耦”思想的储能系统设计体系,明确了绝热压缩与近等温压缩耦合作用下的高效储能特征,澄清了近等温压缩对储能系统高效运行的驱动机制。测试发现,抽水压缩空气复合储能系统的释能响应时间可以缩短至 45 s 以内,且在无蓄热构架下可以实现 65% 以上的热效率。

3.3 压缩空气储能系统运行效能评价方法

该方法基于大数据、人工智能的全生命周期运行节能调控技术等,破解了压缩空气储能系统传统单一性能评价指标的局限,为实现大功率、长时间、低成本、高效储能提供了技术支撑。

为弥补传统热力学和经济学分析能量系统的局限性,团队首次将焓经济学理论引入到先进抽水压缩空气复合储能系统的优化分析中,如图 8 所示,研究了系统运行参数和各性能指标与焓效率之间的关联关系,进而结合系统能量利用过程中的合理性和系统方案的可行性,提出了改善系统热经济性的理论方案。

团队联合耶鲁大学、伦敦大学学院、洛桑理工学院等机构,通过优化更新数据,将热力学动态分析方法与生命周期评估方法耦合,提出了基于完全混合的新型生命周期评估方法^[24-25],如图 9 所示,实现了压缩空气储能技术全生命周期性能的动态评估。研究结果^[26]表明,蓄热设备对压缩空气储能系统生命周期内的环境、热力性能、经济性能影响最大。

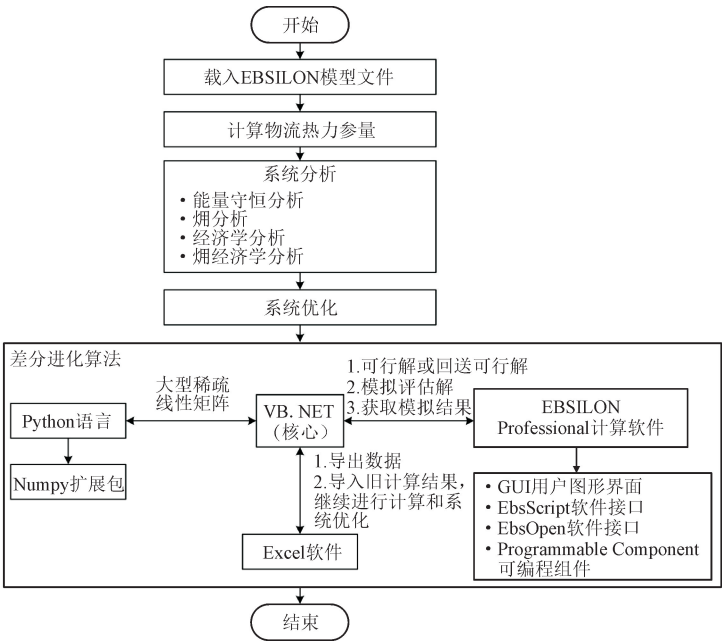
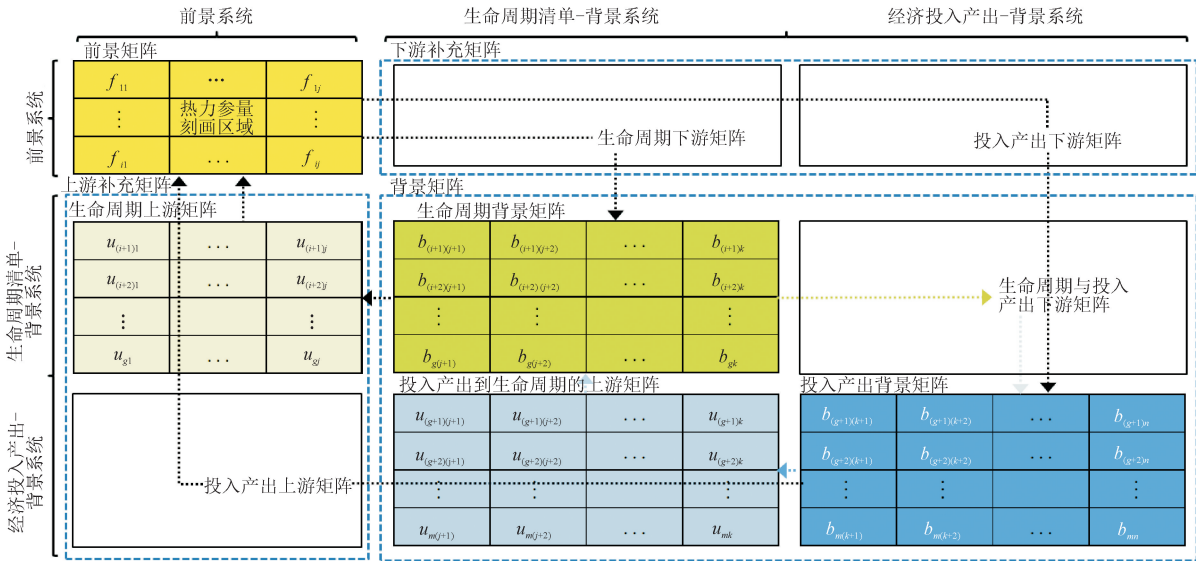


图 8 焓经济学计算模型图

Fig. 8 Calculation flowchart of exergoeconomic analysis



u —上游矩阵元素; b —背景矩阵元素; i, g —行号; j, k —列号; m —最大行号; n —最大列号。

图 9 完全混合的新型生命周期评估模型

Fig. 9 Technology matrix for integrated hybrid life cycle assessment

4 应用前景

团队依托国家储能技术产教融合创新平台、流体机械国家专业实验室,通过共建研究平台、技术股权激励和协同育人等各种形式开展校企合作,联合中国西电集团建立了国内首套 100 kW 气液复合储

能实验平台,实现了高效率、快响应、低成本气液复合储能系统首创设计,验证了该技术的可行性和经济性。此外,该平台还可实现储能与释能设备内三维复杂流场高频信号采集与在线分析、储气装置宽温域-宽压域下温度和压力场实时采集与显示、多运行模块集成与联合运行自动控制等功能,为先进压

缩空气储能技术的研发提供了实验平台。

团队通过与国内龙头企业沈鼓集团合作,基于沈鼓集团-西安交大研究院平台,共建了国内首套以多种智能调节手段为特色的并联压缩机-负荷管网系统试验台,实现了对压缩空气机组的高效节能调控,为压缩空气储能机组运行的高效可靠智能调控关键共性技术验证提供了平台。

通过校企联合攻关,在先进抽水压缩空气复合储能系统设计、近等温空气压缩、低成本复合材料压力容器和系统智能调控方面取得了关键技术突破,显著提高系统能效,将电储能成本降至 $0.2\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,为压缩空气储能技术的产业化应用提供重要支撑。

团队在先进复合压缩空气储能技术领域拥有相关专利60余项,发表高水平学术论文50余篇。课题组积极进行技术推广和应用,当下在技术成果转化及产业化示范工程方面主要开展了以下工作:

(1)与国家电投集团联合开发国家首台套基于压缩空气储能技术的发电厂;

(2)与中国电建集团筹建压缩空气储能联合研发基地;

(3)与上海巨人能源集团签署1.25亿元以上压缩空气储能技术转化协议。

参与建设储能产业化示范项目如下:

(1)华能驿城区抽水压缩空气复合储能项目;

(2)内蒙古自治区阿拉善地区压缩空气储能系统的科研设计工作。

先进抽水压缩空气复合储能技术属于能量型储能技术,装机规模覆盖 $\text{kW}\sim\text{GW}$ 级别,可广泛应用于电源侧储能、电网侧储能及用户侧储能3种类型。该系统所采用的空压机、空气透平、水泵和水轮机等关键设备已全部实现国产自主研发。

参考文献:

- [1] 舒印彪,赵勇,赵良,等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1663-1671.
SHU Yinbiao, ZHAO Yong, ZHAO Liang, et al. Study on low carbon energy transition path toward carbon peak and carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1663-1671.
- [2] 李政,张东杰,潘玲颖,等. “双碳”目标下我国能源低碳转型路径及建议[J]. 动力工程学报, 2021, 41(11): 905-909.
LI Zheng, ZHANG Dongjie, PAN Lingying, et al. Low-carbon transition of China's energy sector and

suggestions with the ‘carbon-peak and carbon-neutrality’ target [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(11): 905-909.

- [3] 陶瑞,胡肖,姚尔人,等. 一种新型复合压缩空气储能系统的热经济学分析[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(3): 23-34.
TAO Rui, HU Xiao, YAO Erren, et al. Thermo-economic assessments of a novel integrated compressed air energy storage system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(3): 23-34.
- [4] 谢小荣,马宁嘉,刘威,等. 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 158-168.
XIE Xiaorong, MA Ningjia, LIU Wei, et al. Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems: review and prospect [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 158-168.
- [5] YAO Erren, WANG Huanran, WANG Ligang, et al. Multi-objective optimization and exergoeconomic analysis of a combined cooling, heating and power based compressed air energy storage system [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 138: 199-209.
- [6] OLABI A G, WILBERFORCE T, RAMADAN M, et al. Compressed air energy storage systems: components and operating parameters: a review [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 34: 102000.
- [7] BAZDAR E, SAMETI M, NASIRI F, et al. Compressed air energy storage in integrated energy systems: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 167: 112701.
- [8] KOOHI-FAYEGH S, ROSEN M A. A review of energy storage types, applications and recent developments [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 27: 101047.
- [9] KEBEDE A A, KALOGIANNIS T, VAN MIERLO J, et al. A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 159: 112213.
- [10] YAO Erren, ZHONG Like, LI Ruixiong, et al. Multiobjective optimization of a combined heating and power system based on compressed-air energy storage and thermochemical technology [J]. Journal of Energy Engineering, 2022, 148(4): 04022024.
- [11] JIANG Runhua, CAI Zhuodi, PENG Kewen, et al. Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of polygeneration system based on advanced

- adiabatic compressed air energy storage system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 229: 113724.
- [12] 陈海生, 李泓, 马文涛, 等. 2021 年中国储能技术研究进展 [J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(3): 1052-1076.
- CHEN Haisheng, LI Hong, MA Wentao, et al. Research progress of energy storage technology in China in 2021 [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(3): 1052-1076.
- [13] CHEN Hao, WANG Huanran, LI Ruixiong, et al. Experimental and analytical investigation of near-isothermal pumped hydro-compressed air energy storage system [J]. *Energy*, 2022, 249: 123607.
- [14] HE Xin, WANG Huanran, LI Ruixiong, et al. Thermo-conversion of a physical energy storage system with high-energy density: combination of thermal energy storage and gas-steam combined cycle [J]. *Energy*, 2022, 239, Part E: 122325.
- [15] ZHAO Pan, LAI Yongquan, XU Wenpan, et al. Performance investigation of a novel near-isothermal compressed air energy storage system with stable power output [J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(14): 11135-11151.
- [16] 李瑞雄, 邹瀚森, 姚尔人, 等. 液体活塞近等温压缩空气储能过程热力性能评估 [J]. *西安交通大学学报*, 2023, 57(5): 58-67.
- LI Ruixiong, ZOU Hansen, YAO Erren, et al. Thermodynamic performance evaluation of the near-isothermal compressed air energy storage system with liquid piston [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2023, 57(5): 58-67.
- [17] YAO Erren, ZHONG Like, ZHANG Yuan, et al. Comprehensive performance exploration of a novel pumped-hydro based compressed air energy storage system with high energy storage density [J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2022, 14(6): 064102.
- [18] YAO Erren, WANG Huanran, LIU Long, et al. A novel constant-pressure pumped hydro combined with compressed air energy storage system [J]. *Energies*, 2015, 8(1): 154-171.
- [19] WANG Huanran, WANG Liqin, WANG Xinbing, et al. A novel pumped hydro combined with compressed air energy storage system [J]. *Energies*, 2013, 6(3): 1554-1567.
- [20] LI Ruixiong, TAO Rui, FENG Xiaojun, et al. Energy distributing and thermodynamic characteristics of a coupling near-isothermal compressed air energy storage system [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 58: 106314.
- [21] LI Ruixiong, TAO Rui, YAO Erren, et al. Comprehensive thermo-exploration of a near-isothermal compressed air energy storage system with a pre-compressing process and heat pump discharging [J]. *Energy*, 2023, 268: 126609.
- [22] LI Ruixiong, TAO Rui, YAO Erren, 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: 107017.
- [23] 姚尔人, 席光, 王焕然, 等. 一种新型压缩空气与抽水复合储能系统的热力学分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(3): 12-18.
- YAO Erren, XI Guang, WANG Huanran, et al. Thermodynamic analysis on a novel compressed-air based pumped hydro energy storage system [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(3): 12-18.
- [24] LI Ruixiong, ZHANG Haoran, CHEN Hao, et al. Hybrid techno-economic and environmental assessment of adiabatic compressed air energy storage system in China-situation [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 186: 116443.
- [25] LI Ruixiong, ZHANG Haoran, WANG Huanran, et al. Integrated hybrid life cycle assessment and contribution analysis for CO₂ emission and energy consumption of a concentrated solar power plant in China [J]. *Energy*, 2019, 174: 310-322.
- [26] LI Ruixiong, TAO Rui, YAO Erren, 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(7): 1-15.

(编辑 亢列梅)

团队介绍：

王焕然,男,教授、博士生导师,国际知名的压缩空气储能技术专家。王焕然提出了先进抽水压缩空气复合储能系统,建立了先进抽水压缩空气复合储能实验平台,还将先进抽水压缩空气复合储能技术应用于解决实际工程问题。该技术大大提高了储能系统效率并且降低了系统投资成本。王焕然获国家科学技术进步二等奖 1 项,发表 SCI 论文 30 余篇,获得授权发明专利 60 余项。所有这些贡献都促进了中国大规模物理储能技术的发展。

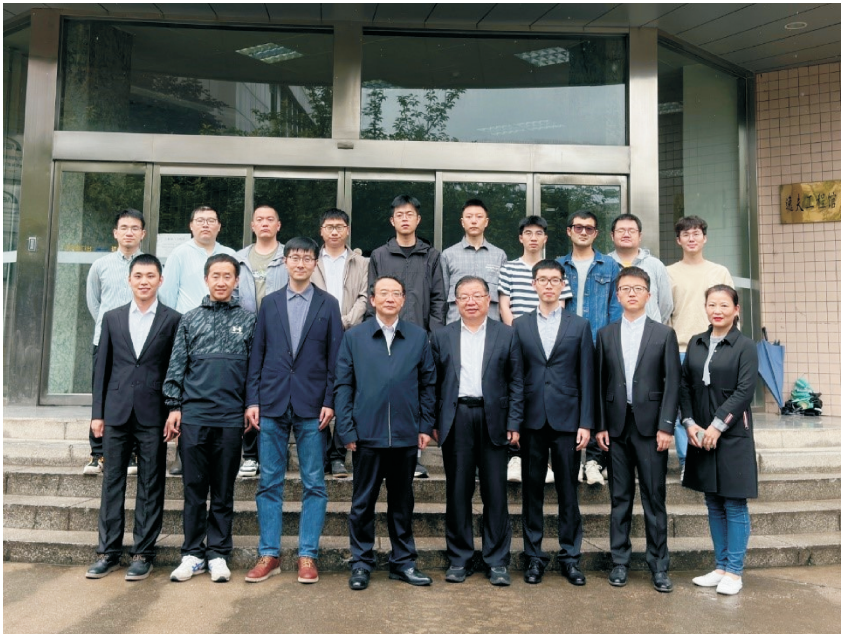


团队负责人:王焕然

席光,男,西安交通大学副校长、教授、博士生导师,国家有突出贡献专家,中国工程热物理学会常务理事、流体机械专委会主任,国家“十一五”期间“863 计划”重点项目“微型燃气轮机”总体专家组组长。席光获国家科技进步二等奖 1 项、教育部与陕西省科技进步一等奖 3 项,获中国青年科技奖、亚洲流体机械学会杰出工程师奖等荣誉称号,主持国家重点研发计划、“863 计划”、国家自然科学基金重点项目等多项国家级科研项目,在能源与动力工程领域发表学术论文 200 余篇,获授权发明专利 50 余项。



团队负责人:席光



团队合影