

特约专栏——新型储能技术研究进展

编者按:压缩空气储能是我国“十四五”规划和2035远景目标纲要明确提出要实施的储能技术之一,对推动可再生能源的发展具有重要意义。适逢清华大学电机系成立90周年,本刊特别约请梅生伟老师团队撰稿,以金坛国家示范项目为例,介绍了非补燃压缩空气储能的基本原理、技术路线、装备研发和工程实践。该研究和工程实践标志着我国实现了在商业运行压缩空气储能领域零的突破,可为构建新型电力系统提供储能新方案,助力实现“碳达峰、碳中和”目标。

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

梅生伟^{1,2}, 张通¹, 张学林¹, 王亚洲¹, 王国华^{1,3}, 卢强¹, 薛小代^{1,2}

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 2. 青海大学新能源光伏产业研究中心, 青海 西宁 810016; 3. 中盐金坛盐化有限责任公司, 江苏 常州 213200)

摘要:储能是构建新型电力系统、支撑能源结构转型升级、实现“碳达峰、碳中和”的关键技术,而非补燃压缩空气储能是极具发展前景的新型大规模储能技术之一,具有大容量、高效率、长寿命、零排放等优点。该文以某60 MW/300 MWh盐穴压缩空气储能发电国家示范项目为例,详细介绍了非补燃压缩空气储能的基本原理、技术路线、装备研发和工程实践。该项目的成功实施,标志着我国新型储能技术的研发和应用取得重大进展,将为构建以新能源为主的新型电力系统提供储能新方案。

关键词:可再生能源; 新型储能技术; 压缩空气储能; 盐穴储气; 金坛国家示范项目

中图分类号: TK123; TK02 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-4956(2022)05-0001-08



Research and engineering practice of non-supplementary combustion compressed air energy storage: Taking Jintan national demonstration project as an example

MEI Shengwei^{1,2}, ZHANG Tong¹, ZHANG Xuelin¹, WANG Yazhou¹,
WANG Guohua^{1,3}, LU Qiang¹, XUE Xiaodai^{1,2}

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. New Energy (Photovoltaic) Industry Research Center, Qinghai University, Xining 810016, China; 3. China Salt Jintan Co., Ltd., Changzhou 213200, China)

Abstract: Energy storage is the key technology to build a novel power system, support the transformation and upgrading of energy-resource structure and realize the target of “Emission peak and carbon neutrality”. Non-supplementary combustion compressed air energy storage (NC-CAES) is one of the most promising new energy storage technologies, which has the advantages of large capacity, high efficiency, long life and zero emission.

收稿日期: 2022-03-07

基金项目: 国家自然科学基金委区域创新发展联合基金(重点项目)(U21A20146、U1766203)

作者简介: 梅生伟(1964—),男,河南新野,博士,长江学者,杰青,IEEE Fellow,教授,青海大学副校长,主要研究方向为电力系统控制、灾变防治、工程博弈论、大规模物理储能技术等, meishengwei@tsinghua.edu.cn。

通信作者: 薛小代(1982—),男,山东临沂,博士,副研究员,主要研究方向为压缩空气储能、可再生能源、能源互联网等, xuexiaodai@tsinghua.edu.cn。

引文格式: 梅生伟,张通,张学林,等.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(5):1-8.

Cite this article: MEI S W, ZHANG T, ZHANG X L, et al. 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(5): 1-8. (in Chinese)

Taking a 60 MW/300 MWh salt cavern compressed air energy storage power station of the national demonstration project as an example, this paper introduces in detail the basic principle, technical route, equipment research and development, and engineering practice of the NC-CAES. The successful construction and operation of the project marks significant progress in the research and application of new energy storage technology in China, which can provide a new energy storage scheme for the construction of a new power system based on renewable energy.

Key words: renewable energy; new energy storage technology; compressed air energy storage; salt cavern air storage; Jintan national demonstration project

随着我国“碳达峰、碳中和”目标的提出，可再生能源将成为未来电力供应的重要组成部分，但是由于可再生能源固有的间歇性和不确定性，导致并网消纳困难，每年弃风、弃光严重^[1]，电网峰谷差逐渐扩大的趋势使得该问题进一步恶化。电力系统迫切需要先进的大规模储能技术来解决可再生能源接入问题，以提高常规电力系统和区域能源系统的效率、安全性及经济性。压缩空气储能具有容量大、寿命长、清洁环保、安全可靠、经济性等优点，是支撑我国大规模发展可再生能源、保障能源安全的关键技术之一，是国家“十四五”规划和2035年远景目标纲要明确指出要实施的储能技术之一。因此，开展压缩空气储能技术研究，对解决电能的大规模工程化存储难题、推动可再生能源的蓬勃发展具有重大意义。

1 压缩空气储能

1.1 压缩空气储能基本原理

压缩空气储能（compressed air energy storage, CAES）系统采用压缩空气作为储能载体，是一种以机械设备实现能量存储及跨时间、空间转移和利用的物理储能技术^[2-4]，其基本原理如图1所示。压缩空气储能系统主要分为储能和释能两个工作过程：储能时，电动机驱动压缩机将环境空气压缩至高压状态并存入储气装置，电能在该过程中转化为压缩空气的内能和压力势能（步骤1和2）；释能时，储气装置中存储的压缩空气进入空气透平膨胀机中膨胀做功发电，压缩空气中蕴含的内能和压力势能在该过程中重新转化为电能（步骤3和4）。

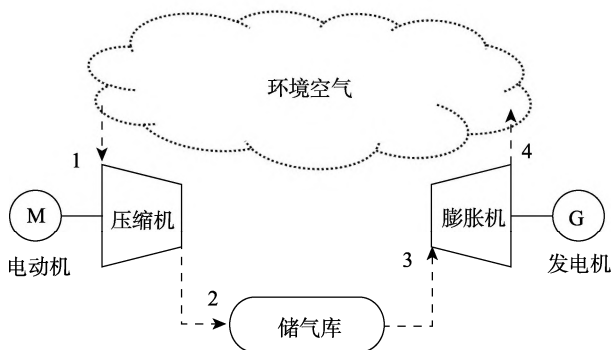


图1 压缩空气储能系统基本原理示意图

作为一种极具发展潜力的物理储能技术，压缩空

气储能可广泛应用于电源侧、电网侧和用户侧，一般可用于以下场景^[5-6]：

（1）负荷中心削峰填谷。我国区域电网峰谷差呈现逐年扩大趋势，压缩空气储能技术可以高效利用谷段、平段等闲置时段电网剩余通道，削减电网峰谷负荷差，提高电网通道利用水平。

（2）消纳大规模可再生能源发电。实现大规模可再生能源的高效消纳是我国能源结构转型和构建新型电力系统的必然途径。压缩空气储能技术具有能量储存及跨时间、空间转移利用的特征，可有效调节可再生能源出力特性，增加其可调度水平，促进可再生能源高效消纳。

（3）智能电网辅助服务。除削峰填谷外，压缩空气储能技术具有调频、调相、紧急事故备用和黑启动等多种功能，可为智能电网提供多样化的辅助服务，提高电网利用水平。

（4）综合能源系统能量枢纽。压缩空气储能系统可以与光热、地热或工业余热相耦合，以其作为综合能源系统的能量枢纽，可发挥其多能联储多能联供性，显著提高系统布置的灵活性和利用效率。

1.2 补燃式压缩空气储能技术

自1949年Stal Laval提出利用地下洞穴实现压缩空气储能以来，国内外学者和研究机构围绕压缩空气储能技术开展了大量的研究和实践工作，其中最先发展起来的是补燃式压缩空气储能。通过借鉴燃气动力循环，补燃式压缩空气储能在膨胀机前设置燃烧器，利用天然气等燃料与压缩空气混合燃烧，以提升空气透平膨胀机进气温度。20世纪全球仅有的两座商业化运行的压缩空气储能电站均为补燃式压缩空气储能系统。1978年，全球首座压缩空气储能电站Huntorf在联邦德国投入运营，发电装机290 MW，可连续供电2 h，标志着压缩空气储能技术正式进入能源市场^[7]；1991年，全球第二座压缩空气储能电站McIntosh在美国投入运营，发电装机110 MW，最长可连续供电26 h^[8]。

补燃式压缩空气储能结构简单，技术成熟度高、设备运行可靠、投资成本低、使用寿命长，具备与燃气电站类似的快速响应特性。然而，在当前大力发展绿色能源、控制碳排放量的大背景下，补燃式压缩空气储能的碳排放已成为其最大弊端。随着能源结构调

整和环保压力增大, 开发完全不依赖天然气的清洁高效压缩空气储能技术已成为储能领域研究的热点。

1.3 清洁压缩空气储能研究进展

和补燃式压缩空气储能技术不同, 清洁压缩空气储能通过非燃烧、无化石燃料的技术手段来满足膨胀过程中的加热需求, 以实现高效、可靠的电力存储和再生。根据热能来源和应用方式的不同, 清洁压缩空气储能又可进一步划分为绝热压缩空气储能、等温压缩空气储能和液态空气储能等不同的技术路线。

1.3.1 绝热压缩空气储能

绝热压缩空气储能在压缩过程中通过提升压缩机单级压缩比获得较高温度的压缩空气和较高品位的压缩热能, 并将压力势能和压缩热能解耦储存。释能时, 利用储热装置将压缩热反馈给高压空气, 实现空气压力势能和压缩热能的耦合释能, 提高系统的整体效率。根据储热温度的不同, 绝热压缩空气储能又可分为高温绝热压缩空气储能和中温绝热压缩空气储能。高温绝热压缩空气储能以德国莱茵电力公司 (RWE) 的 ADELE 项目为代表^[9], 该项目采用高温压缩机将空气压缩至 10 MPa、600 °C, 以达到 70% 的理论储能效率。然而高温压缩和高温高压固体蓄热技术难度极大, 该项目自 2010 年后处于停滞状态并最终被取消。中温绝热压缩空气储能适当降低了压缩机排气温度 (< 400 °C), 可基于当前成熟的关键设备技术和工艺水平开展设计和制造, 系统稳定性、可控性较强, 易于实现工程化应用。截至 2020 年底, 全球已开展的压缩空气储能工程实践大部分采用了中温绝热压缩空气储能技术路线。

1.3.2 等温压缩空气储能

等温压缩空气储能系统^[10]在准等温压缩过程和膨胀过程实现能量的储存和转换, 在压缩过程中实时分离压缩热能和压力势能, 使压缩空气不发生较大的

温升; 相应地, 在膨胀过程中, 实时将存储的压缩热能回馈给压缩空气, 使压缩空气不发生较大的温降。等温压缩空气储能系统的优点是系统结构简单、运行参数低, 但其装机功率一般较小, 仅适用于小容量的储能场景, 例如分布式储能。

1.3.3 液态压缩空气储能

液态空气储能在绝热压缩空气储能技术的基础上引入了低温过程和蓄冷装置, 将空气液化后常压存储, 可大幅提升储能密度, 减小系统储气容积, 减少电站对地形条件的依赖^[11]。但由于增加了蓄冷系统, 导致系统结构更为复杂。同时, 由于蓄冷系统在储能和释能过程中存在动态损失, 导致系统的储能效率偏低。和绝热压缩空气储能相比, 液态空气储能技术还是一项有待深入研究和完善的技术。

2 非补燃压缩空气储能技术

2.1 非补燃压缩空气储能技术原理

2011 年, 本团队提出了基于压缩热回馈的非补燃压缩空气储能技术路线^[12], 以实现压缩空气储能技术与国产化设备设计和生产水平的契合, 从而降低投资成本、促进压缩空气储能在国内的工程应用, 如图 2 所示。其工作原理是, 利用弃风弃光或低谷电驱动压缩机将空气压至储气室, 同时利用换热器将压缩热存至储热装置, 实现电能向压力势能和压缩热能的解耦存储。发电时, 释放高压空气, 经过储存的压缩热加热, 形成高温高压空气驱动透平膨胀机发电。同时, 系统储存的压缩热可以对外供热, 通过调整运行工况, 透平出口的低温空气可以对外制冷。因此, 非补燃压缩空气储能是一个冷热电联供的系统, 全过程没有碳排放, 综合效率高。从技术分类上, 非补燃压缩空气储能属于中温绝热压缩空气储能技术路线。

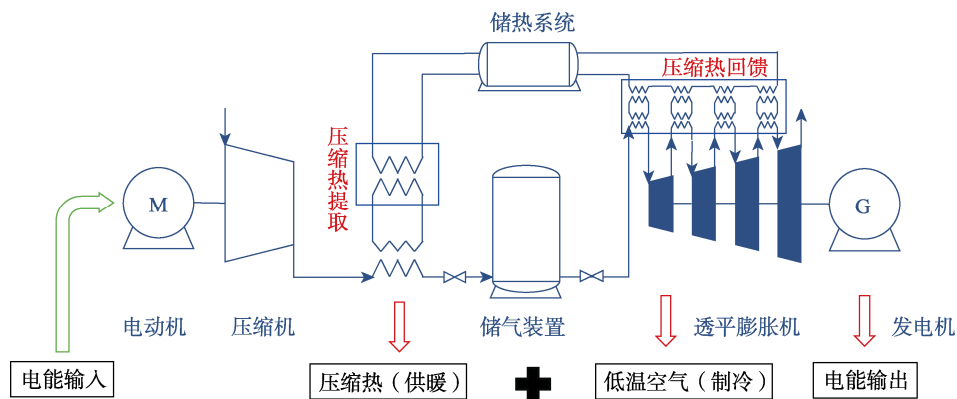


图 2 基于压缩热回馈的非补燃压缩空气储能技术

2.2 非补燃压缩空气储能实验验证

2012 年, 在国家电网公司大力支持下, 清华大学 (Tsinghua University) 联合中国科学院理化技术研究

所 (Technical Institute of Physics and Chemistry, TIPC) 及中国电力科学研究院 (China Electric Power Research Institute, CEPRI), 在国内率先开展压缩空气储能系

统的技术验证和工程实践工作,于2014年在安徽省芜湖市建成了 TICC-500 (500 kW Tsinghua-IPCCAS-CEPRI CAES) 电站^[13],如图3所示。电站采用5级压缩、3级膨胀的布置方式,储热系统以加压水作为储热介质,蓄热温度为120℃。储气系统采用两个钢制卧式储气罐并联,单个储气容积为50 m³,共计100 m³。电站设计发电功率为500 kW,最大连续发电时长为1 h,电-电效率41%,能量综合利用效率72%。TICC-500电站的建成和成功并网运行标志着国产化压缩空气储能系统在工艺设计技术、关键设备技术和工程应用技术等多方面取得突破。

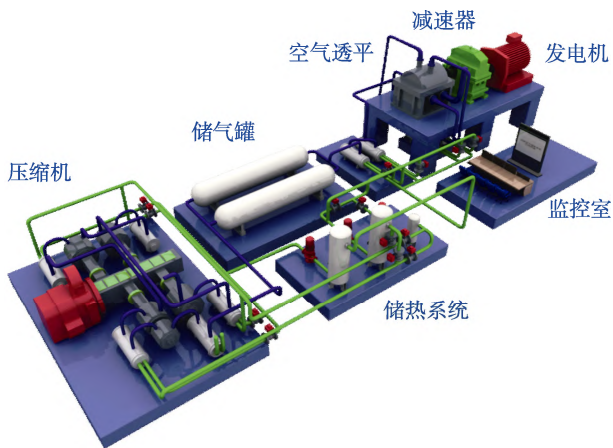


图3 安徽芜湖 TICC-500 压缩空气储能工业试验电站模型

为了进一步提升压缩空气储能系统的效率,清华大学提出了光热复合压缩空气储能技术路线,并借助我国西部地区极为丰富的光热资源开展了试验验证工作。2017年,清华大学联合青海大学在青海西宁搭建了100 kW 光热复合压缩空气储能工业试验电站^[14],并成功实现了全系统联合运行发电,系统电-电效率51%,能量综合利用效率达80%,如图4所示。该电站将非补燃压缩空气储能系统与光热集热系统复合起来,利用光热系统取代绝热压缩空气储能系统中的储热系统,采用导热油作为蓄热介质存储太阳能光热并加热空气透平进气,蓄热温度为260℃,大大提高了



图4 青海西宁 100 kW 光热复合压缩空气储能工业试验电站

系统的储能效率。该电站为太阳能的综合利用和消纳提供了新的思路,在西部光热资源丰富地区具有广阔应用前景。

3 金坛国家示范项目

非补燃压缩空气储能全过程无污染和排放,具有大容量、高效率、长寿命、零排放等优点,是目前大规模储能领域极具潜力的发展方向之一。然而,其在推广应用受到了储气系统容量及成本的限制,采用盐穴储气技术可以很好地解决这一问题。中盐金坛盐化有限公司自2003年起,率先在国内开始建造天然气盐穴储气库,形成了集盐穴采矿、造腔、利用于一体的新型盐产业模式。鉴于清华大学在非补燃压缩空气储能方面取得的研究成果及中盐金坛在盐穴储气技术方面的成功经验,2017年5月27日,国家能源局批复立项了江苏金坛60 MW/300 MWh 盐穴压缩空气储能发电国家示范项目(以下简称“金坛国家示范项目”)。项目一期将建设60 MW/300 MWh 盐穴压缩空气储能电站,未来将分期建设总装机容量达到1 000 MW 的压缩空气储能电站群,打造大规模清洁物理储能基地。

3.1 盐穴储气技术

盐穴是采用人工开采方式在盐岩层或盐丘层中形成的腔体,其一般采用钻井水溶法进行建造,具有力学性能稳定、储气压力高、气密性好、造价低、技术成熟、储气容量大等优点,可以用来储存石油、天然气、压缩空气等液态及气体产品^[15]。

国外利用盐穴作为储气库的历史最早可追溯到20世纪40年代,期间加拿大首次采用盐穴存储油类制品,1949年美国开始采用盐穴储存液化石油气,之后盐穴储气技术在欧美得到迅速推广。截至2018年底,欧美共有地下储气库群140余座,总库容量超过200亿 m³。我国对盐穴储气的研究起步较晚,2007年2月,作为我国“西气东输”的重要配套项目,金坛储气库工程正式运行,成为亚洲首个地下盐穴储气库^[16]。截至2020年10月,我国在建或规划盐穴储气库群12个,在运行盐穴储气库群3个,在运行盐穴共计44个,储气量超15亿 m³。

盐穴储气作为一种优良的大规模储气方式,与压缩空气储能系统相结合,相得益彰。20世纪投入商业运行的德国 Huntorf 电站和美国 McIntosh 电站均采用地下盐穴作为储气库。2001年初,德国 Huntorf 电站对储气盐穴的形状进行了检测,发现盐穴体积收缩率为0.15%/年,平均沉降速率3.24 mm/年,盐穴形状与电站初建时相差无几,未发现气体泄漏,充分表明了盐穴储气技术的可靠性。

3.2 项目概况及技术路线

金坛国家示范项目位于江苏省常州市金坛区薛埠镇, 毗邻茅山, 距常州市约 65 km, 距南京市约 100 km。金坛盐矿是 20 世纪 60 年代由华东石油地质局在该地区进行石油普查时发现的, 但直到 80 年代末才进行勘探和开发。金坛盐矿盐盆占地约 60.5 km², 探明储量 162.42 亿 t, 年产盐达 200 多万 t。金坛盐矿一般储藏于地表下 800~1 000 m, 盐层厚度可达 230 m, 一般在 150~170 m, 盐盆边缘厚度为 50~80 m。在这个厚度岩盐层中完全可以建造一个单体高 120~135 m, 直径 80~100 m、容积 10 万~40 万 m³ 的单体盐穴群。此外, 金坛盐矿 NaCl 含量高、泥盐夹层少、矿层顶底板分布稳定、密封性好, 具有建造盐穴储气库的良好地质条件。

金坛国家示范项目由中盐集团、华能集团和清华大学共同建设, 采用优化的非补燃压缩空气储能技术路线, 其结构及原理如图 5 所示, 主要技术参数如表 1 所示, 工艺流程如图 6 所示。该系统由电动机、压缩机组、盐穴储气库、蓄热系统、膨胀机组、发电机、调度控制系统和送出系统组成。其中, 压缩机组采用两级离心式压缩机组, 各级出口均布置蓄热换热器; 膨胀机组采用两级轴流式空气透平膨胀机, 各级前均布置回热换热器, 用于加热透平进气。蓄热系统采用高温合成导热油作为储热和换热工质, 最高蓄热温度可达 360 ℃。高压空气储存于地下盐穴中, 盐穴容积为 22.4 万 m³, 可大幅节省占地空间和建设成本。项目经 1 回 110 kV 专线接入 220 kV 冯家变, 能够有效提高当地电网的调节能力, 支撑电网安全经济运行。

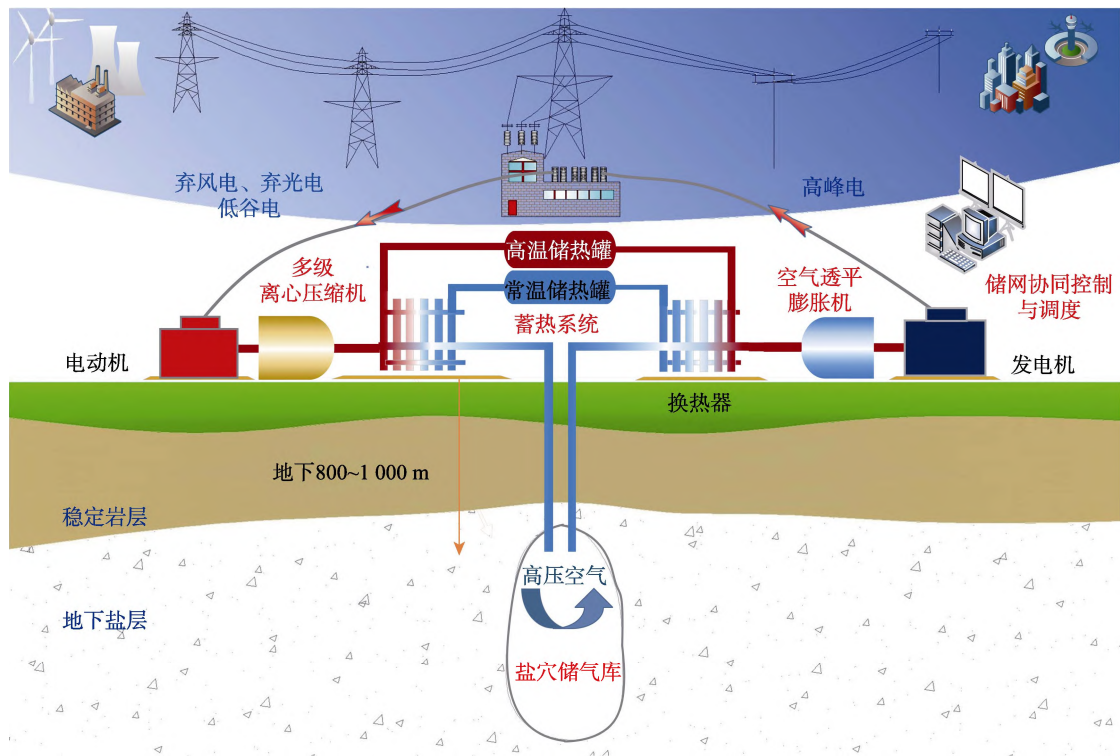


图 5 金坛国家示范项目结构原理示意图

表 1 金坛国家示范项目主要技术参数

序号	参数	数值
1	空气压缩机组级数	2
2	空气透平膨胀机级数	2
3	压缩时长/h	8
4	发电时长/h	5
5	年运行天数/d	330
6	发电机额定功率/MW	60
7	储气库容积/m ³	22.4×10 ⁴
8	设计储能效率/%	>60

金坛国家示范项目为日调度的调峰电站, 根据当地用电负荷状况, 电站的运行模式如下:

(1) 储能过程。运行时间为 23:00 至次日 7:00, 利用低谷电、弃风电等驱动压缩机由环境中吸气并压缩, 产生高温高压空气进入压缩侧油气换热器中与导热油进行换热, 导热油吸热升温后进入高温导热油罐, 压缩空气放热降温再经冷水塔冷却至环境温度后进入盐穴储气库中进行储存。

(2) 能量储存。时间为 7:00—13:00, 此时压力势能以高压空气的形式储存于盐穴储气库中, 压缩热能以高温导热油的形式储存于高温导热油罐中。

(3) 释能过程。运行时间为 13:00—18:00, 此时为用电高峰时段, 高压空气从储气库中释放, 在发电

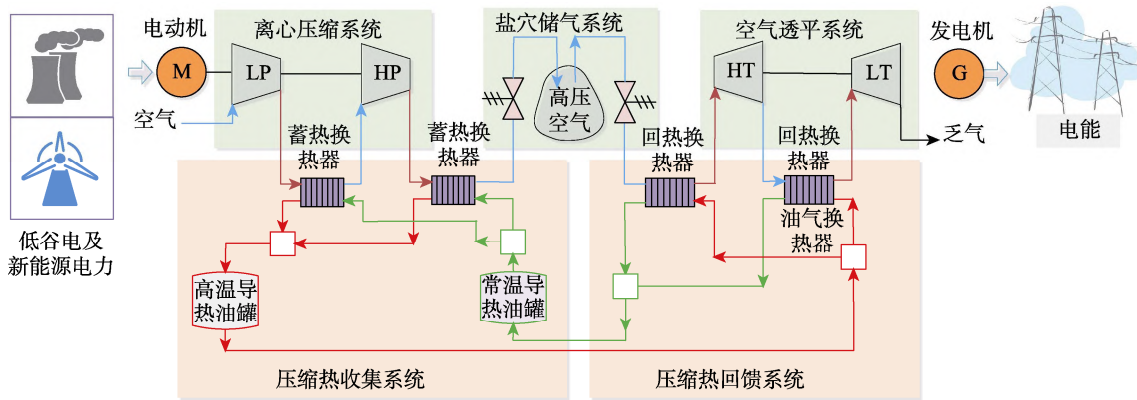


图6 金坛国家示范项目工艺流程图

侧油气换热器内被高温导热油加热后进入带中间再热器的二级空气透平膨胀做功，完成发电过程。

(4) 待储过程：时间为 18:00—23:00，释能过程结束后，储气库内压力降至初始状态，导热油放热完毕后进入常温导热油罐，等待下一个储能过程开始。

此外，除释能过程外，透平发电机组以调相模式运行，以少量的高压空气及热能损耗为代价，采用高压空气直接驱动透平发电机组使其保持同步转速，通过励磁控制发出或吸收一定量的无功功率，从而实现电网无功电压支撑的功能^[17]。

3.3 关键装备设计研发

非补燃压缩空气储能涉及电力、热工、机械、流体、材料以及控制等多个技术领域，学科深度交叉耦合，技术难度大。而在系统运行过程中，能量在电能、

热能、机械能以及压力势能等不同形式之间相互传递和转换，如何实现能量的大规模存储和高效转换是一个非常棘手的难题。为了解决上述难题，本项目团队突破了高负荷-宽工况离心压缩、低焓损高效蓄热/换热、大容量稳定储气和宽压力-变工况膨胀发电等四大技术瓶颈，研发了一系列的关键技术装备，并成功应用于金坛国家示范项目，如图 7 所示。

3.3.1 高负荷-宽工况非稳态离心压缩机

压缩机是非补燃压缩空气储能系统电能输入与转化的关键设备，常规多级离心压缩机以压力势能为单一优化目标进行设计，无法满足非补燃压缩空气储能系统对高品位热能的需求，且常规多级离心压缩机组运行工况单一，缺乏应对宽工况和快速响应需求的智能控制机制。

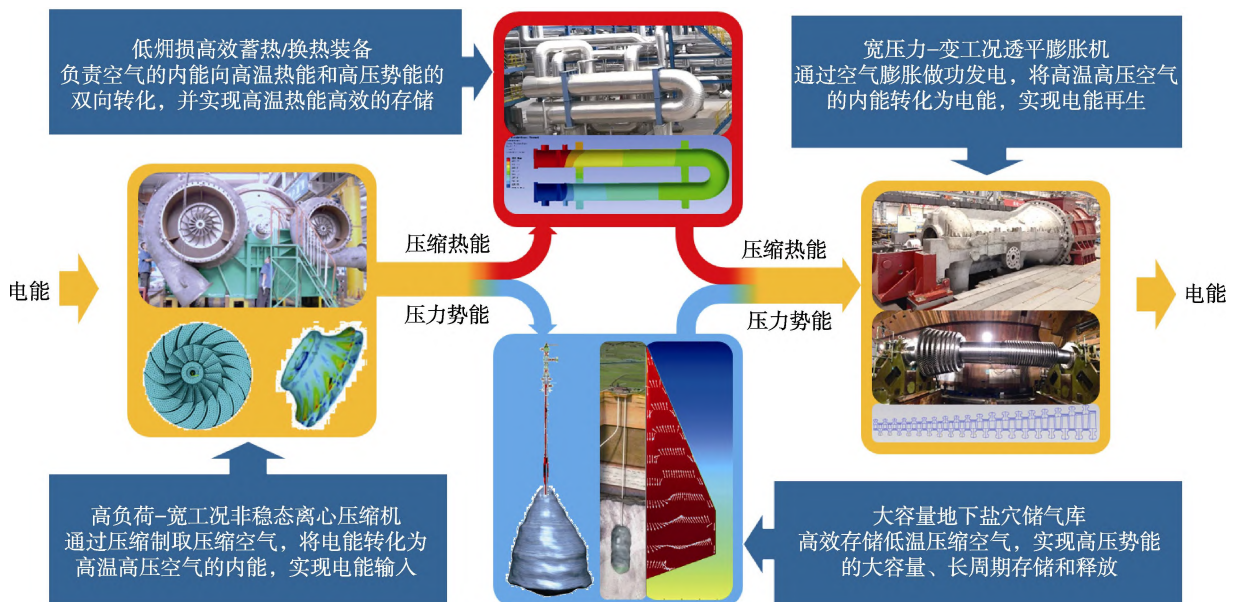


图7 金坛国家示范项目关键装备研发

针对这一技术瓶颈，项目团队提出了面向非补燃压缩空气储能的多级离心压缩机设计方法，将多级压缩机划分为稳定背压区和线性背压区，在稳定背压区进行定速大压比压缩以提高压缩热能品位，在线性背

压区进行变速小压比压缩以应对背压变化，解决了多级压缩机因背压变化而导致的变工况高效运行难题；首次提出了“同步冲转、同步升压”的快速启动控制方案，将多级离心压缩机冷态启动至满负荷输出的时

间由 30 min 降至 10 min 以内, 满足了电网灵活调度下压缩机组频繁启停、快速响应技术的需求。通过本项目的研究, 有效解决了大规模非补燃压缩空气储能系统多级离心压缩机高参数、宽工况设计和运行控制问题, 研发了高负荷-宽工况非稳态多级离心压缩机 (见图 8), 并成功应用于金坛国家示范项目。



图 8 高负荷-宽工况非稳态离心压缩机

3.3.2 低焓损高效蓄热/换热装备

非补燃压缩空气储能系统压缩热属于中高温热能, 其高效解耦置换、储存和耦合回馈对于系统效率有着重要的影响。针对压缩空气储能系统压缩热特性, 项目团队提出了压缩热高效储存和利用技术, 在国际上首次将高温合成导热油作为储热介质应用于压缩空气储能工程实践中。储能时, 采用导热油作为载体存储高温压缩热能, 提高了压缩热的储存温度, 降低了焓损失。释能时, 高品位压缩热能用于加热空气透平膨胀机进气温度以提高发电量, 低品位压缩热能用于供暖及其他用途, 提高系统的储能效率和能量综合利用效率。

与常规热力系统换热设备相比, 非补燃压缩空气储能系统的换热器面临频繁启停、热应力大、换热器

冷热端温差大、换热器流动阻力对系统效率影响较大等诸多挑战。为此, 项目团队提出了低焓损低流阻的多级串联 hairpin (发夹式) 换热技术, 实现了全逆流换热, 提高了换热效率。应用该技术设计的换热器管板温差小、疲劳寿命高, 其 U 型换热管和壳体大弯曲半径能够承载更高的热膨胀, 有效抑制热应力的产生, 确保换热器的使用寿命大于 40 年。依托该技术, 项目团队研发了大容量、高温参数的发夹式导热油-空气换热器 (见图 9), 单台换热功率 20 MW, 有效提高了设备的性能, 并成功应用于金坛国家示范项目。



图 9 发夹式导热油-空气换热器

3.3.3 大容量地下盐穴储气库

国外商业化运行的压缩空气储能电站多采用地下盐穴储气, 但国内尚无相关工程经验可供借鉴。金坛国家示范项目为日调度的调峰电站, 其储气系统的注采特性也和以季度调度为主的天然气储气库有较大的差别。

为保障盐穴储气库运行的稳定性和可靠性, 项目团队对金坛盐穴资源进行了地质调研和地层分析, 结合中盐金坛公司盐穴现状, 选定采卤完毕的茅 8 井为示范项目盐穴。采用声呐测腔和可视化数据分析方法得到茅 8 井盐穴三维形态图和尺寸图, 如图 10 所示。

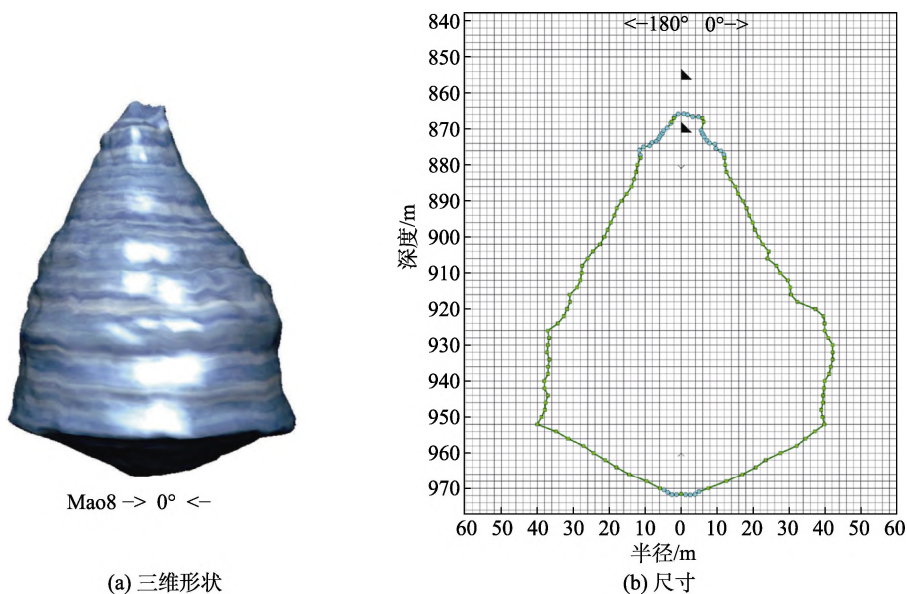


图 10 茅 8 井盐穴储气库三维形状及尺寸

盐穴呈梨形分布, 容积 22.4 万 m^3 , 埋深 865~972 m, 最大直径 80.1 m, 净高度 106.6 m。搭建了盐穴压力稳定性仿真平台, 对茅 8 井储气库进行了安全性分析, 仿真结果表明, 盐穴使用 30 年后的蠕变变形为 0.65%, 可满足储气库的安全稳定运行。为满足示范工程对于注采量的要求, 对茅 8 井进行了老井封堵和新井改建, 并进行了气密封施压试验, 压降趋势符合评价标准, 可满足储气库运行压力的要求。

3.3.4 宽压力-变工况透平膨胀机

非补燃压缩空气储能系统在发电过程中需要实时响应电网侧的调度需求, 调整空气透平膨胀机出力, 因此空气透平膨胀机需要能够实现较宽范围的变工况运行, 同时还要具备对进气压力、进气温度、工质流量等多参数变化的快速响应能力。项目团队提出了基于全场热平衡的空气透平整体热力流程设计方法, 研发了百兆瓦级空气透平膨胀机设计方案, 可实现空气透平 0~110% 宽工况高效运行; 创建了大型非补燃空气透平快速启动方法, 将百兆瓦级压缩空气储能空气透平启动时间降至 5 min, 大幅提升空气透平快速响应能力, 有力支撑了电网调峰、调频、调压等功能需求。

基于上述技术, 研发了世界首台 60 MW 非补燃空气透平膨胀机 (见图 11), 并于 2021 年 9 月 30 日成功实现并网发电运行。上述研究成果解决了未来大型非补燃压缩空气储能电站空气透平膨胀机宽工况设计和运行控制难题, 同时也可为其他领域空气透平膨胀机设计提供有益的借鉴。



图 11 宽压力-变工况透平膨胀机

3.4 电站建设

金坛国家示范项目总占地面积约 40 000 m^2 , 采用分区布置、模块化设计, 东侧依次为压缩机房、换热区、透平机房、储热区, 西侧依次为办公区、辅助系统区及送出系统区, 其中辅助系统包括综合水系统、泵房、冷却塔、消防系统等, 如图 12 所示。盐穴储气库距厂区约 1 km, 采用地下浅埋压缩空气管道的方式与主厂区连接。金坛国家示范项目于 2021 年 9 月 30 日实现并网发电, 充分检验了设备的可靠性和系统的高效性。

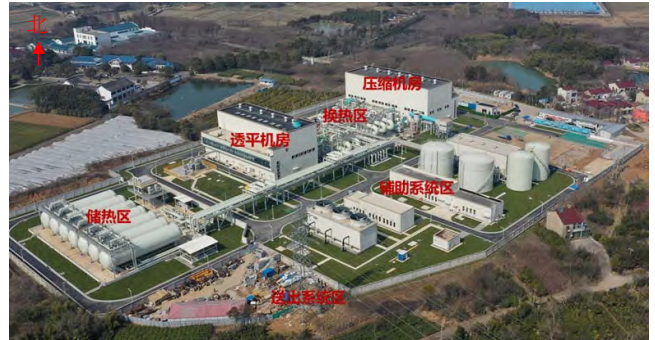


图 12 60 MW/300 MWh 盐穴压缩空气储能发电国家示范项目鸟瞰图

4 结语

国家能源局江苏金坛 60 MW/300 MWh 盐穴压缩空气储能发电国家示范项目的投产运行, 实现了我国在商业运行压缩空气储能领域零的突破, 也是国际上首座实现商业运行的非补燃压缩空气储能工业电站。这标志着我国新型储能技术的研发和应用取得重大进展, 将为构建以新能源为主的新型电力系统提供储能新方案, 并助力实现我国“碳达峰、碳中和”目标。

压缩空气储能技术具有广泛的应用场景, 在电网侧, 压缩空气储能具备调峰、调频、调相、旋转备用和黑启动等众多功能, 可有效提高电网运行安全性和经济性; 在电源侧, 压缩空气储能可与光伏、风电相结合, 构成风储或光伏一体化系统, 提升新能源发电消纳率; 在负荷侧, 压缩空气储能可充分利用多能联储多能联供特性, 以其为枢纽构建综合能源系统, 提高能源综合利用效率。我国盐穴、煤矿、矿井资源丰富, 可以提供大规模储气空间, 为发展压缩空气储能提供了便利的条件。在我国大力发展新型电力系统和双碳目标愿景下, 未来压缩空气储能技术将具有非常广阔的应用前景。

参考文献 (References)

- [1] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-8.
- [2] BUDET 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, 170: 250-68.
- [3] 梅生伟, 李瑞, 陈来军, 等. 先进绝热压缩空气储能技术研究进展及展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2893-2907.
- [4] 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.
- [5] 薛小代, 梅生伟, 林其友, 等. 面向能源互联网的非补燃压缩空气储能及应用前景初探[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 164-171.
- [6] 梅生伟, 公茂琼, 秦国良, 等. 基于盐穴储气的先进绝热压缩空气储能技术及应用前景[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3392-3399.

(下转第 14 页)

- [2] SCHUCK P. On the analysis of protein self-association by sedimentation velocity analytical ultracentrifugation[J]. *Analytical Biochemistry*, 2003, 320(1): 104–124.
- [3] HOWLETT G J, MINTON A P, RIVAS G. Analytical ultracentrifugation for the study of protein association and assembly[J]. *Current Opinion in Chemical Biology*, 2006, 10(5): 430–436.
- [4] ALI S A, IWABUCHI N, MATSUI T, et al. Reversible and fast association equilibria of a molecular chaperone, gp57A, of bacteriophage T4[J]. *Biophysical Journal*, 2003, 85(4): 2606–2618.
- [5] ZHAO H, LOMASH S, GLASSER C, et al. Analysis of high affinity self-association by fluorescence optical sedimentation velocity analytical ultracentrifugation of labeled proteins: Opportunities and limitations[J]. *PLoS One*, 2013, 8(12): e83439.
- [6] SCHUCK P. Sedimentation velocity analytical ultracentrifugation: Discrete species and size-distributions of macromolecules and particles[M]. Boca Raton, The United States: CRC Press, 2016.
- [7] SCHUCK P, ZHAO H. Sedimentation velocity analytical ultracentrifugation: Interacting systems[M]. Boca Raton, The United States: CRC Press, 2017.
- [8] ZHAO H, LI W, CHU W, et al. Quantitative analysis of protein self-association by sedimentation velocity[J]. *Current Protocols in Protein Science*, 2020, 101(1): e109.
- [9] LYTLE B L, SONG J, DE LA CRUZ N B, et al. Structures of two Arabidopsis thaliana major latex proteins represent novel helix-grip folds[J]. *Proteins: Structure, Function and Genetics*, 2009, 76(1): 237–243.
- [10] HAO Q, YIN P, YAN C, et al. Functional mechanism of the abscisic acid agonist pyrabactin[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2010, 285(37): 28946–28952.
- [11] HAO Q, YIN P, LI W, et al. The molecular basis of ABA-independent inhibition of PP2Cs by a subclass of PYL proteins [J]. *Molecular Cell*, 2011, 42(5): 662–672.
- [12] ZHANG X, ZHANG Q, XIN Q, et al. Complex structures of the abscisic acid receptor PYL3/RCAR13 reveal a unique regulatory mechanism[J]. *Structure*, 2012, 20(5): 780–790.
- [13] MERCADANTE D, MELTON L D, NORRIS G E, et al. Bovine beta-lactoglobulin is dimeric under imitative physiological conditions: dissociation equilibrium and rate constants over the pH range of 2.5–7.5[J]. *Biophysical Journal*, 2012, 103(2): 303–312.
- [14] SCHUCK P, ZHAO H, BRAUTIGAM C A, et al. Basic Principles of Analytical Ultracentrifugation[M]. Boca Raton, The United States: CRC Press, 2016.
- [15] CHATURVEDI S K, MA J, ZHAO H, et al. Use of fluorescence-detected sedimentation velocity to study high-affinity protein interactions[J]. *Nature Protocols*, 2017, 12(9): 1777–1791.
- [16] ZHAO H, MAYER M L, SCHUCK P. Analysis of protein interactions with picomolar binding affinity by fluorescence-detected sedimentation velocity[J]. *Analytical Chemistry*, 2014, 86(6): 3181–3187.
- [17] CHATURVEDI S K, SAGAR V, ZHAO H, et al. Measuring ultra-weak protein self-association by non-ideal sedimentation velocity[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2019, 141(7): 2990–2996.
- [18] CHATURVEDI S K, MA J, BROWN P H, et al. Measuring macromolecular size distributions and interactions at high concentrations by sedimentation velocity[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 4415.

(上接第8页)

- [7] CROTOGINO F, MOHMEYER K U, SCHARF R. Huntorf CAES: More than 20 years of successful operation[C]//Solution Mining Research Institute (SMRI). Orlando, Florida, United States, 2001.
- [8] ANDERSSON L, DAVIS L, SCHAIKNER R. Operating experience and lessons learned at Alabama Electric cooperative's 110-MW 26-hour CAES plant[C]//Power generation conference. Anaheim, United States, 1995.
- [9] ZUNFT S, FREUND S. Large-scale electricity storage with adiabatic CAES-the ADELE-ING project[C]//Energy Storage Global Conference. Paris, France, 2014.
- [10] BOLLINGER B. Demonstration of isothermal compressed air energy storage to support renewable energy production[R]. Seabrook: Sustainx Incorporated, 2015.
- [11] MORGAN R, NELMES S, GIBSON E, et al. Liquid air energy storage—Analysis and first results from a pilot scale demonstration plant[J]. *Applied Energy*, 2015, 137(3): 845–853.
- [12] 梅生伟, 薛小代, 陈来军, 等. 一种非补燃式压缩空气储能系统: CN107299891B[P], 2019-10-18.
- [13] MEI S, WANG J, TIAN F, et al. Design and engineering implementation of non-supplementary fired compressed air energy storage system: TICC-500[J]. *Science China Technological Sciences*, 2015, 58(4): 600–11.
- [14] 陈晓戮, 王国华, 司杨, 等. 改进的光热复合压缩空气储能系统设计方案及其仿真分析[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(5): 20–26.
- [15] 谭蓉蓉. 亚洲首个“盐穴储气库”在金坛投运[J]. *天然气工业*, 2007(2): 100.
- [16] 郑雅丽, 赵艳杰. 盐穴储气库国内外发展概况[J]. *油气储运*, 2010, 29(9): 652–655.
- [17] 李广阔, 王国华, 薛小代, 等. 金坛盐穴压缩空气储能电站调相模式设计与分析[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(19): 91–99.