

压缩空气储能系统的效率提升及成本优化研究

春 辉

西安西电新能源有限公司 陕西 西安 710075

摘 要：本文聚焦压缩空气储能系统，阐述其基于气体压缩与膨胀的原理及关键组件与技术。分析系统设计参数、气体成分等效率影响因素，提出压缩机与膨胀机优化、热管理、储气罐结构优化及智能化控制等效率提升策略。同时剖析成本构成，从关键工艺成本控制和建立成本控制模型两方面研究成本优化路径，旨在为压缩空气储能系统的高效、低成本发展提供理论与策略支持。

关键词：压缩空气储能系统；效率提升；成本优化；策略研究

1 压缩空气储能系统原理与关键技术

1.1 系统工作原理

压缩空气储能系统是一种基于气体压缩与膨胀原理实现能量存储与释放的技术。在储能阶段，系统利用富余电能驱动压缩机，将空气压缩至高压状态并储存于储气装置中。此过程中，空气的内能增加，温度升高，为提高储能效率，通常采用多级压缩与中间冷却技术，降低每级压缩后的空气温度，减少压缩功消耗。压缩后的高压空气被输送至储气库，储气库可以是地下洞穴、废弃矿井或人工压力容器等，其容量和密封性直接影响储能系统的规模 and 性能。在释能阶段，储气库中的高压空气经回热器加热后进入膨胀机做功。回热器的作用是回收压缩空气在储能阶段产生的热量，用于加热释能时的高压空气，提高空气进入膨胀机时的温度，从而增加膨胀机的输出功率^[1]。膨胀机带动发电机旋转，将机械能转化为电能，实现能量的释放。整个过程通过压缩机、储气装置、回热器和膨胀机等核心设备的协同工作，完成了电能的存储与转换。

1.2 关键组件与技术

压缩机：作为储能系统的核心设备之一，压缩机的性能直接影响储能效率。目前常用的压缩机类型包括活塞式压缩机、离心式压缩机和螺杆式压缩机等。活塞式压缩机具有压缩比大、适应性强等优点，但结构复杂、维护成本高；离心式压缩机流量大、效率高，适用于大规模储能系统，但对气体纯度和运行工况要求较高；螺杆式压缩机结构简单、运行平稳，在中低压范围应用广泛。为提高压缩机效率，常采用多级压缩、变频调速和优化叶轮设计等技术。储气装置是储存压缩空气的关键部件，其性能要求包括高强度、良好的密封性和耐腐蚀性等。地下储气库具有容量大、成本低等优点，但受地质条件限制较大；人工压力容器则具有选址灵活、建设

周期短等特点，但成本相对较高。为确保储气装置的安全性和可靠性，需采用先进的材料和制造工艺，并进行严格的质量检测和监测。回热器是实现热能回收与利用的重要设备，其性能直接影响系统的热效率和能量转换效率。常见的回热器类型包括管壳式回热器、板式回热器和蓄热式回热器等。管壳式回热器结构简单、换热面积大，但体积庞大；板式回热器换热效率高、结构紧凑，但对流体压力和温度变化敏感；蓄热式回热器可实现热量的长期储存和稳定释放，但系统复杂、成本较高。为提高回热器性能，需优化换热器结构、选择合适的换热材料和改善流体流动状态。膨胀机是将压缩空气的内能转化为机械能的关键设备，其性能直接影响释能阶段的发电效率。常用的膨胀机类型与压缩机类似，包括活塞式膨胀机、离心式膨胀机和螺杆式膨胀机等。为提高膨胀机效率，需优化叶轮设计、采用先进的密封技术和提高转速控制精度等。

2 压缩空气储能系统效率影响因素分析

2.1 系统设计参数

系统设计参数对压缩空气储能系统的效率具有重要影响。其中，压缩比和膨胀比是关键参数之一。压缩比过高会导致压缩机功耗增加，同时使压缩空气温度升高，增加冷却负荷；膨胀比过大则会使膨胀机出口压力过低，影响发电效率。因此，需根据系统的实际运行工况和性能要求，合理选择压缩比和膨胀比。系统的压力损失也是影响效率的重要因素。在压缩、储存和膨胀过程中，空气在管道、阀门和设备内的流动会产生压力损失，降低系统的有效压力和能量转换效率。为减少压力损失，需优化系统布局、选用低阻力管道和阀门，并定期进行维护和清洗。

2.2 气体成分与纯净度

气体成分和纯净度对压缩空气储能系统的性能和寿

命具有重要影响。空气中的杂质如灰尘、水分和油污等会加速设备磨损、腐蚀管道和阀门,降低系统的可靠性和效率。特别是水分在低温环境下会凝结成冰,堵塞管道和设备,影响系统的正常运行。因此,需对进入系统的空气进行严格的过滤和干燥处理,确保气体成分符合要求^[2]。另外,若采用其他气体如氮气或混合气体作为储能介质,需考虑气体的物理性质和化学稳定性对系统性能的影响,并进行相应的实验和研究。

2.3 热交换与散热效率

热交换与散热效率是影响压缩空气储能系统效率的关键因素之一。在储能阶段,压缩空气产生的热量需通过冷却系统及时散发出去,以降低压缩功消耗;在释能阶段,回热器需将储存的热量有效传递给高压空气,提高其进入膨胀机时的温度。若热交换效率低下,会导致系统热量损失增加、能量转换效率降低。为提高热交换与散热效率,需优化热交换器结构、选用高导热系数的材料和改善流体流动状态。同时,可采用先进的散热技术如液冷散热、热管散热等,提高系统的散热能力。

2.4 材料与表面处理技术

材料与表面处理技术对压缩空气储能系统的性能和寿命具有重要影响。压缩机、膨胀机、储气装置和管道等设备在运行过程中会承受高压、高温和腐蚀等恶劣工况,需采用高强度、耐腐蚀和耐磨损的材料。同时设备表面的粗糙度、硬度和平整度等也会影响其摩擦性能和密封性能,进而影响系统的效率。为提高设备的性能和寿命,需选用合适的材料并进行先进的表面处理技术如镀层、喷涂和渗碳等,改善设备表面的物理和化学性质。

3 压缩空气储能系统效率提升策略

3.1 压缩机与膨胀机技术优化

压缩机与膨胀机技术的优化是提高压缩空气储能系统效率的关键。在压缩机方面,可采用多级压缩与中间冷却技术,降低每级压缩后的空气温度,减少压缩功消耗;优化叶轮设计,提高压缩机的等熵效率和容积效率;采用变频调速技术,根据系统负荷变化调节压缩机转速,实现节能运行。在膨胀机方面,可优化叶轮形状和流道结构,提高膨胀机的等熵效率和内效率;采用先进的密封技术,减少气体泄漏损失;提高转速控制精度,确保膨胀机稳定运行,还可研究新型压缩机和膨胀机技术如超临界压缩机和透平膨胀机等,进一步提高系统的能量转换效率。

3.2 热管理与能量回收

热管理与能量回收是提高压缩空气储能系统效率的重要手段。在储能阶段,可采用高效的冷却系统及时散

发压缩空气产生的热量,降低压缩功消耗;同时,回收冷却系统中的余热用于预热进入压缩机的空气或供暖等,提高能源利用效率。在释能阶段,优化回热器设计,提高热能回收效率;研究新型热交换技术如相变热交换和化学热交换等,实现热量的高效储存和释放^[3]。此外,还可考虑将压缩空气储能系统与其他能源系统如太阳能、风能和地热能等相结合,实现多能互补和综合利用,进一步提高系统的整体效率。

3.3 储气罐结构优化与设计

储气罐结构的优化与设计对提高压缩空气储能系统的效率和安全性具有重要意义。在储气罐材料方面,可选用高强度、耐腐蚀和轻量化的材料如碳纤维复合材料等,降低储气罐重量和成本;同时研究新型结构形式如球形储气罐和薄膜储气罐等,提高储气罐的承压能力和密封性能。在储气罐设计方面,需考虑其容量、形状和布局等因素对系统效率的影响。合理选择储气罐容量可满足系统不同工况下的储能需求;优化储气罐形状可减少空气流动阻力;科学布局储气罐可降低系统压力损失和占地面积,还需加强储气罐的安全监测和维护管理,确保其长期稳定运行。

3.4 智能化控制与能量管理系统

智能化控制与能量管理系统是实现压缩空气储能系统高效运行的关键。通过引入先进的传感器、控制器和执行器等设备,实现对系统运行参数的实时监测和精确控制;采用智能算法和优化模型对系统进行优化调度和能量管理,提高系统的响应速度和调节能力。例如,根据电网负荷变化和电价波动情况,自动调整系统的储能和释能策略;在系统出现故障或异常情况时,及时发出警报并采取相应措施保障系统安全。另外,还可通过大数据分析和人工智能技术对系统运行数据进行挖掘和分析,为系统的优化设计和运行维护提供决策支持。

4 压缩空气储能系统成本优化研究

4.1 成本构成分析

压缩空气储能系统的成本构成较为复杂,涵盖多个方面。设备购置成本是系统成本的核心部分,像压缩机,作为储能系统的“心脏”,其性能和规格直接影响价格,高品质、大容量的压缩机往往价格高昂;膨胀机、储气装置、回热器等关键设备也因材质、工艺等因素价格不菲,管道的材质、长度和铺设方式也会增加成本。安装调试成本同样不可忽视,设备安装需要专业人员进行精准操作,确保各部件连接紧密、运行稳定;管道铺设要合理规划路线,避免过多弯折和损耗;系统调试则需反复测试和调整参数,保证系统达到最佳运行状

态,这些环节都需要投入大量人力、物力和时间。运行维护成本包括设备运行时的能耗,如压缩机、冷却系统等电力消耗;定期的维护保养,如更换易损件、清洗设备等;还有人员管理费用,包括操作人员、维护人员的工资等。土地使用成本与系统选址和占地面积相关,若选址在城市中心或土地资源紧张的地区,成本会大幅增加。为降低系统成本,必须对各项成本进行细致剖析,明确成本控制的关键所在。

4.2 关键工艺成本控制

关键工艺成本控制是降低压缩空气储能系统成本的关键路径。在设备制造环节,优化生产工艺是降低成本的有效方法。例如,采用先进的铸造、加工技术,提高零部件的精度和质量,减少后续加工工序和废品率;提高生产效率可以通过引入自动化生产线、优化生产流程等方式实现,缩短生产周期,降低单位产品的生产成本;降低原材料消耗则需要精准计算材料用量,采用轻量化、高强度的材料替代传统材料,在保证设备性能的前提下减少材料使用量。同时加强设备质量管理和检测至关重要,严格的质量把控可以减少设备故障率,降低维修成本和因设备故障导致的生产损失。在系统安装方面,模块化设计能将系统分解为多个标准模块,便于运输和安装,提高安装效率;标准化施工可以规范施工流程 and 操作方法,保证施工质量,减少施工浪费和返工现象。在运行维护方面,建立完善的设备维护管理制度和预防性维护体系,定期对设备进行检修和保养,能提前发现潜在问题并及时处理,延长设备使用寿命,降低运行成本。采用智能化监控技术实时监测设备运行状态,可快速准确地定位故障,提高维修效率。

4.3 成本控制模型建立

建立成本控制模型是实现压缩空气储能系统成本优化的重要手段。首先,要全面收集系统设计、制造、安装和运行等过程中的成本数据,这些数据涵盖了设备价格、材料费用、人工成本、能耗数据等各个方面,是建立模型的基础。通过对这些数据的深入分析,运用统计学方法和数

学模型,建立成本预测模型和成本控制模型。成本预测模型可以根据系统的规模、技术参数等因素,预测系统在不同阶段的成本情况,为项目决策提供参考;成本控制模型则可以对实际成本进行实时监控和分析,与预测成本进行对比,找出成本偏差的原因^[4]。利用这些模型,能够精准找出成本控制的薄弱环节和优化潜力点。针对这些问题,制定针对性的成本控制措施和优化方案,如与供应商谈判降低设备价格、优化施工流程减少浪费等,实现系统成本的持续降低。同时,要考虑成本与性能之间的平衡关系,不能为了降低成本而牺牲系统性能,要在保证系统稳定、高效运行的前提下,寻求成本的最小化。政策引导和市场机制也能发挥重要作用,政府可以通过补贴、税收优惠等政策鼓励企业降低成本,市场则通过竞争促使企业不断提高效率、降低价格,推动压缩空气储能技术的成本降低和规模化应用。

结束语

压缩空气储能系统作为重要的储能技术,其效率提升与成本优化对于推动能源转型意义重大。通过对其原理、关键技术、效率影响因素及提升策略的深入研究,并剖析成本构成与优化方法,明确了系统发展的方向。未来,需持续技术创新,平衡好效率与成本关系,借助政策与市场力量,推动该技术规模化应用,为构建清洁低碳、安全高效的能源体系贡献力量。

参考文献

- [1]王光磊,苗井泉,徐震,等.自力式恒压压缩空气储能系统热力学特性分析[J].热能动力工程,2025,40(03):153-159.
- [2]贾明祥,骆贵兵,舒进,等.500kW非补燃压缩空气储能系统建模仿真[J].热力发电,2020,49(08):50-54.
- [3]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(07):2295-2305+2408.
- [4]文贤旭,李翔,钟景亮等.压缩空气储能发电调节系统性能测试[J].自动化与仪器仪表,2021,No.258(04):203-206.