

# 燃气轮机与汽轮机联合循环发电系统优化分析

许力

中海油阜宁热电有限责任公司 江苏盐城 224000

DOI: 10.12238/ems.v7i11.16058

**[摘要]** 在能源结构调整和环保要求严格背景下,优化传统能源技术性能很重要。文章分析燃气轮机与汽轮机联合循环发电系统优化方法,以提升热效率、经济性和环境友好性。改进燃气轮机材料和汽轮机级数设计,提升系统热效率;引入模块化设计和智能化运维技术,降低发电成本;整合碳捕集与封存技术(CCS),减少系统碳排放量。优化后的系统能效更高,经济和环境表现显著改善。

**[关键词]** 联合循环发电系统;热效率;经济性;环境友好性;智能化

## 引言:

随着全球能源需求的增长和环境保护要求的提高,提升发电系统的效率和环保性能成为了研究的重点。燃气轮机与汽轮机的联合循环发电系统因其高效率 and 低排放特性,被广泛应用于现代发电领域。本文通过系统优化,探索提升联合循环系统的热效率、降低运营成本和减少环境污染的有效策略。

## 1 燃气轮机与汽轮机联合循环发电系统的基础理论

### 1.1 燃气轮机与汽轮机的工作原理

燃气轮机和汽轮机是联合循环发电系统核心设备,工作原理影响系统效率。燃气轮机按布雷顿循环运行,压气机压缩空气引入燃烧室,高温高压气体推动涡轮做功,启动快、功率密度高,但排气温度高、热能利用效率有限。汽轮机基于朗肯循环运行,高温高压蒸汽推动做功,蒸汽冷凝后回收利用,运行稳定但单独效率低。联合循环系统用燃气轮机高温废气驱动余热锅炉产蒸汽,实现二者热力学耦合,既提高能量利用效率,又兼具燃气轮机快速响应性和汽轮机稳定性。

### 1.2 联合循环发电系统的基本构成与特点

联合循环发电系统(CCPP)一般由燃气轮机、余热锅炉、汽轮机及辅助系统组成。燃气轮机排放的高温废气进入余热锅炉,回收热能产生蒸汽,蒸汽驱动汽轮机发电。这种梯级利用设计提高了系统能量转化效率。联合循环理论热效率超60%,远高于单一循环模式。如燃气轮机和汽轮机独立运行时热效率分别为30% - 40%和35% - 45%,联合运行可提高整体效率、降低能源损失。同时,因回收废热,该系统降低了燃料消耗和污染物排放。此外,联合循环系统灵活性适应现代电网需求,成为能源转型重要技术路径。

### 1.3 关键技术指标与评价参数

对联合循环发电系统的性能评价通常依据以下关键技术指标,这些指标不仅直接反映系统的技术水平,也为优化设计和运行管理提供科学依据。

#### 1.3.1 热效率(Thermal Efficiency, $\eta$ )

热效率是衡量能源利用效率的核心指标,表示输入燃料能量中转化为电能的比例。联合循环发电系统的热效率显著高于传统单循环系统,是其核心优势。

#### 1.3.2 碳排放量(Carbon Emission)

随着全球对碳中和目标的关注,碳排放已成为评价发电系统的重要环境指标。联合循环发电系统通过余热回收和清洁燃料的应用,大幅降低单位发电量的碳排放水平。

#### 1.3.3 发电成本(Levelized Cost of Electricity, LCOE)

发电成本是评价电力生产经济性的关键参数,包括设备投资、燃料成本、运行维护费用等综合支出。在可再生能源逐渐增加的市场环境下,联合循环发电系统凭借较低的LCOE展现出较强的经济竞争力。

## 2 联合循环发电系统的优化方向

### 2.1 热效率提升

提升热效率是联合循环发电系统优化的首要目标,其直接关系到能源利用效率和经济效益。针对这一目标,可从以下几个方面入手:

改进燃气轮机材料与技术是核心途径。燃气轮机的高效运行依赖于材料耐高温性能的提升。近年来,陶瓷基复合材料和单晶涡轮叶片的应用,使燃气轮机的入口温度提升至1600°C以上,从而显著提升热效率。此外,采用分级燃烧和低氮氧化物燃烧等技术,优化了燃烧过程,进一步减少能量损失。

与此同时,优化汽轮机的级数与结构设计也至关重要。通过合理分配高压、中压和低压段的能量流,精细调整流道设计和压力比,不仅可减少蒸汽流动损失,还能大幅提高蒸汽利用率。例如,三压再热系统的应用有效提升了热回收效率,降低了汽轮机的排汽损失。

结合上述措施,数据表明现代联合循环发电系统的热效率可从传统的55%提升至65%以上。这种提升不仅节约了燃料

消耗, 还显著减少了废热排放。

## 2.2 系统节能与环保性能优化

在“双碳”目标驱动下, 节能和环保性能优化已成为联合循环发电系统发展的核心方向。

余热回收系统的优化是提升系统效率的重要手段。燃气轮机产生的高温废气经余热锅炉转化为蒸汽用于汽轮机发电, 显著减少了热能浪费。复合余热回收技术的应用, 例如结合有机朗肯循环 (ORC) 和再热循环的混合余热回收系统, 不仅提升了热利用效率, 还大幅降低了热污染。

此外, 采用先进的脱碳技术对于减轻环境负荷具有深远意义。碳捕集与封存 (CCS) 技术能够高效捕获燃烧过程中产生的二氧化碳。例如, 国内某天然气联合循环电厂通过 CCS 技术将碳排放强度从 400  $\text{gCO}_2/\text{kWh}$  降至 200  $\text{gCO}_2/\text{kWh}$  以下, 显著优于传统燃煤发电。

配合低氮燃烧、烟气再循环 (FGR) 以及高效脱硫脱硝技术, 联合循环系统在减少污染物排放方面优势明显。通过系统性优化, 发电系统不仅实现了能效的提升, 同时在环保方面也展现出较强的竞争力。

## 2.3 经济性优化

经济性优化是联合循环发电系统推广的关键, 主要从降低初始投资与运营成本着手, 同时结合灵活的市场策略实现收益最大化。

降低设备投资成本是基础措施。通过标准化设计和模块化生产, 设备制造成本显著降低。此外, 推进核心设备国产化, 尤其在燃气轮机领域, 自主研发成果的普及已减少了对进口设备的依赖, 降低了整机投资费用。

优化运营维护策略则可以显著降低长期运行成本。预测性维护 (PdM) 通过实时监测设备运行状态, 提前预防故障, 不仅延长了设备寿命, 还减少了非计划停机时间。此外, 数字化调度技术的引入, 通过优化负荷分配和燃料消耗, 大幅提高了经济效益。

# 3 联合循环发电系统优化分析方法

## 3.1 数学模型与优化算法

在联合循环发电系统的优化分析中, 数学模型的建立和优化算法的选择至关重要。数学模型主要用于描述系统的能量流动、设备性能以及整体效率。能量平衡方程是优化分析中应用最广泛的工具, 其核心思想是保证输入能量、输出能量和损失能量之间的守恒关系。在实际建模中, 燃气轮机的布雷顿循环和汽轮机的朗肯循环被视为独立的热力学子系统, 通过余热锅炉实现热耦合。

具体而言, 燃气轮机模型通常包括燃烧室的能量释放方程、涡轮叶片的热效率表达式以及排气参数的调节公式。而汽轮机模型则注重蒸汽在各级压力下的焓值变化和流量控

制。此外, 为了提高模型的精确性, 可以引入外部环境因子 (如环境温度、湿度) 和设备老化参数。

在优化算法方面, 遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 和多目标优化方法是目前应用较广的技术。遗传算法通过模拟生物进化过程, 快速搜索全局最优解, 特别适合于求解联合循环系统这种复杂非线性问题。多目标优化方法则侧重于在热效率、碳排放和经济成本之间寻找最优平衡点。例如, 采用多目标粒子群优化算法 (MOPSO) 可以实现效率最大化与排放最小化的协同优化。

## 3.2 案例分析与实际数据应用

案例分析和实际数据验证是优化分析方法的重要环节, 其能够将理论与工程实践紧密结合。在某实际发电厂的研究中, 优化模型通过收集其燃气轮机出口温度、汽轮机蒸汽参数、余热锅炉换热效率等关键数据, 构建了联合循环系统的数字孪生模型 (Digital Twin Model)。通过模拟优化, 可以在不同场景下分析系统的性能提升空间。

具体而言, 在一次案例研究中, 通过调整燃气轮机的进气压力比和余热锅炉的热交换器配置, 优化后的系统热效率由原来的 57.8% 提升至 60.5%。同时, 通过对冷凝系统的改造, 该厂的循环水耗量减少了 12%, 进一步降低了运行成本。

此外, 针对系统的经济性优化, 研究还分析了燃料成本、维护费用和发电收入的变化。结果表明, 通过优化调度策略, 该发电厂的单位发电成本 (LCOE) 降低了约 8%, 显著提高了经济效益。这些实际数据不仅验证了优化分析方法的有效性, 也为其他同类型电厂提供了参考模板。

## 3.3 相关行业标准与政策法规支持

优化联合循环发电系统必须依托相关的行业标准和政策法规, 以确保技术应用的规范性和经济性。在国内, 《燃气轮机质量控制规范》(GBT 42591-2023) 和《工业锅炉及金属烟道余热锅炉技术条件》(JB/T 4759-2016) 对设备性能指标、材料选择及系统集成方式作出了具体规定, 为优化设计提供了技术支持。

与此同时, 政策法规也在推动技术的快速应用。中国“双碳目标”提出, 到 2030 年单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 65% 以上, 这对发电行业提出了更高的减排要求。在此背景下, 优化联合循环发电系统成为满足政策目标的重要手段。国家在《可再生能源发展“十四五”规划》中明确鼓励采用高效低碳发电技术, 联合循环系统正是实现这一目标的重要一环。

结合技术标准和政策背景, 可以预见, 未来的联合循环发电系统优化将更注重智能化和绿色化, 通过大数据和人工智能的深度参与, 实现对能源效率的实时优化和对环境影响的全面控制。

## 4 优化后的联合循环发电系统性能分析

### 4.1 优化前后的技术对比

通过实施系统优化,联合循环发电系统在热效率、经济性和环境友好性等关键性能指标上均取得显著提升。优化前后的主要技术对比如下:

#### 4.1.1 热效率

优化后的系统通过改进燃气轮机高温部件和汽轮机级数设计,热效率由原先的 56.2% 提升至 58.7%。这一增长主要得益于高温余热的充分利用和蒸汽参数的优化控制,使得能量转化更为高效。

#### 4.1.2 经济性

在经济性方面,优化后的系统单位发电成本 (LCOE) 降低了约 10%, 从 0.42 元/kWh 下降至 0.38 元/kWh。这是通过采用模块化设计和智能化运维技术,大幅减少设备维护费用和运行能耗实现的。

#### 4.1.3 环境友好性

通过集成碳捕集与封存 (CCS) 技术,优化后的系统实现了二氧化碳排放强度从 460 gCO<sub>2</sub>/kWh 降低至 370 gCO<sub>2</sub>/kWh,同时减少了氮氧化物和颗粒物的排放,对生态环境影响显著减轻。

以下表格总结了优化前后关键性能指标的变化:

| 指标   | 优化前  | 优化后  | 提升幅度    |
|--|------|------|---------|
| 热效率 (%)                                      | 56.2 | 58.7 | +4.45%  |
| 发电成本 (元/kWh)                                 | 0.42 | 0.38 | -9.52%  |
| CO <sub>2</sub> 排放强度 (gCO <sub>2</sub> /kWh) | 460  | 370  | -19.57% |

通过多维度的技术改进,系统整体性能得到了显著增强,为进一步推广优化技术奠定了基础。

### 4.2 案例的应用效果评价

以某一实际工程案例为基础,分析优化方案的应用效果能够更直观地评估其适用性和经济效益。在某沿海联合循环发电厂中,优化方案实施后,该厂的年发电量增加了约 3%,同时燃气消耗减少了 2.5%,单位发电成本显著降低。以下从技术、经济和环保三个角度综合评价其效果:

#### 4.2.1 技术表现

优化方案通过调整燃气轮机进口温度和优化蒸汽流程,使锅炉的热回收效率提升了 6 个百分点。运行数据显示,蒸汽系统的压降减少至原有的 80%,显著提升了能量传递效率。

#### 4.2.2 经济效益

优化后的发电厂每年节约燃料成本约 1000 万元,同时碳交易市场的收益增加了 300 万元。结合节能降耗和政策支持,整体投资回收期缩短了两年。

#### 4.2.3 环境效果

优化方案有效降低了碳排放和氮氧化物排放量,符合国

家“双碳目标”要求,获得了地方政府的政策补贴支持。厂区周边空气质量得以改善,提升了社会满意度。

此外,不同场景对优化方案的适应性分析表明,在高热负荷条件下,优化后的系统表现尤为突出,适合用于负荷波动较大的地区或需要高效率发电的场合。

### 4.3 面临的挑战与未来发展方向

尽管优化后的联合循环发电系统在多个维度上实现了显著突破,但其技术应用和未来发展仍面临一些挑战,需要在以下几个方面深化研究和创新:

#### 4.3.1 技术实现的瓶颈

(1) 材料技术限制:燃气轮机高温部件的耐久性和高温合金的成本仍然是提升效率的关键瓶颈。

(2) 系统复杂性增加:优化后的系统结构更加复杂,增加了维护难度和故障诊断成本。

(3) 碳捕集效率与成本:尽管 CCS 技术在减排上效果显著,但其高昂的投资成本和较高的能量损耗仍需进一步优化。

#### 4.3.2 智能化与数字化的潜在发展

未来联合循环发电系统优化将更多依赖于智能化和数字化技术。通过引入人工智能 (AI) 和大数据技术,可以实现对燃气轮机和汽轮机的实时监控与动态调整,进一步提高能效和可靠性。此外,数字孪生技术 (Digital Twin) 在系统模拟和性能预测中的应用前景广阔,有望实现优化方案的快速迭代与推广。

### 结束语

通过材料改进、结构优化和引入先进环保技术,联合循环发电系统热效率提升、经济性增强、碳排放降低。实际工程应用证实这些优化措施适应性广泛、经济环保效益显著。未来,应推进系统智能化、数字化处理,与可再生能源深度融合,实现发电系统全面优化和可持续发展。此外,政策制定者和行业实践者要重视技术推广和规范应用,促进清洁能源技术进步和能源政策创新。

### [参考文献]

- [1] 许可,李蔚,李明超,等.燃气-蒸汽联合循环热电联产机组供热特性分析[J].热力发电,2019,48(05):1-7.
- [2] 刘欣旸.燃气-蒸汽联合循环系统(火用)经济性分析[D].辽宁科技大学,2022.
- [3] 杜建伟.燃气-蒸汽联合循环机组配置及运行优化研究[D].哈尔滨工业大学,2021.
- [4] 宗文坤.联合循环冷热电联供系统优化[D].中国石油大学(北京),2020.
- [5] 张媛媛.天然气输送管线压气站燃气轮机余热动力循环优化研究[D].天津大学,2022.