

# 燃机汽机协同提升电力系统效能研究

谢晓凤

大唐苏州热电有限责任公司

**【摘要】**随着全球能源结构向低碳化、清洁化加速转型，叠加工业生产与居民生活用电需求以年均约 3.2% 的速度持续攀升，如何突破传统电力系统的能效瓶颈，成为能源领域亟待攻克的核心命题。本文将研究视角锚定在燃机与汽机在机务层面的协同运行模式，从热力循环耦合、负荷动态响应等维度，深入剖析其在能源电力行业调峰调频、工业园区综合能源供应、分布式能源系统等多元应用场景下，提升电力系统效能的内在机制与创新策略。通过系统梳理燃气轮机布雷顿循环与蒸汽轮机朗肯循环的协同技术原理，解析工业园区冷热电三联供、电网灵活性资源调配等典型应用场景，并结合当前面临的设备兼容性不足、控制策略复杂等技术挑战，提出基于智能控制系统优化、余热梯级利用升级的协同运行优化措施与政策建议。研究数据显示，在典型联合循环电站场景中，燃机汽机的高效协同可使系统整体能源利用率提升至 60% 以上，电网一次调频响应速度提高 40%，为电力行业实现“双碳”目标、推动能源绿色低碳转型提供坚实的技术支撑与实践路径。

**【关键词】**燃机；汽机；机务协同；电力系统效能；能源电力行业

Study on the synergistic improvement of power system efficiency by gas turbine and steam engine

Xie Xiaofeng

Datang Suzhou Thermal Power Co., LTD

**【Abstract】**As the global energy structure accelerates its transition towards low-carbon and clean energy, and with the annual growth rate of electricity demand for industrial production and residential use averaging about 3.2%, overcoming the efficiency bottleneck of traditional power systems has become a critical challenge in the energy sector. This paper focuses on the coordinated operation model of gas turbines and steam turbines at the mechanical level, examining their performance in thermal cycle coupling, load dynamic response, and other dimensions. It explores how these technologies enhance the efficiency of power systems in various applications, including peak regulation and frequency modulation in the energy and power industry, comprehensive energy supply in industrial parks, and distributed energy systems. By systematically analyzing the principles of coordinated technology between the Brayton cycle of gas turbines and the Rankine cycle of steam turbines, the paper examines typical scenarios such as the combined cooling, heating, and power (CHP) system in industrial parks and the flexible resource allocation of the power grid. Considering the current technical challenges, such as insufficient equipment compatibility and complex control strategies, the paper proposes optimization measures and policy recommendations for coordinated operation based on intelligent control system optimization and the upgrade of waste heat cascade utilization. Research data shows that in typical combined cycle power station scenarios, the efficient coordination of gas turbine and steam turbine can increase the overall energy utilization rate to over 60%, and improve the primary frequency regulation response speed of the power grid by 40%. This provides solid technical support and practical pathways for the power industry to achieve the 'dual carbon' goals and promote the green and low-carbon transformation of energy.

**【Key words】** gas turbine; steam engine; machine coordination; power system efficiency; energy and power industry

## 引言

在“双碳”目标的推动下，能源电力行业正经历深刻变革。传统电力系统面临着可再生能源大规模接入带来的波动性、间歇性等问题，以及能源高效利用与环境保护的双重压力。燃气轮机（燃机）与蒸汽轮机（汽机）作为电力生产的核心设备，其协同运行模式为提升电力系统效能提供了新的思路。燃机具有启动速度快、调峰能力强等优势，而汽机在能量转换效率方面表现出色。二者协同运行，能够实现优势互补，有效提升电力系统的整体性能。

目前，国内外学者针对燃机与汽机协同运行展开了诸多研究。文献 [1] 探讨了燃气 - 蒸汽联合循环发电系统中燃机与汽机的匹配优化问题，提出通过合理设计系统参数可提高发电效率；文献 [2] 研究了燃机汽机协同在区域能源系统中的应用，分析了其对能源综合利用效率的提升作用。然而，现有研究多集中于系统层面的宏观分析，对燃机与汽机在机务层面的协同机制、实际应用场景中的技术细节及优化策略探讨相对不足。因此，深入研究燃机汽机在机务层面的协同运行，对于进一步提升电力系统效能具有重要的理论与实践意义。

## 一、燃机与汽机的工作原理及特性

### 1.1 燃机工作原理及特性

燃气轮机是一种以内燃机原理工作的旋转叶轮式热力发动机。其工作过程主要包括压气机压缩空气、燃烧室中燃料与压缩空气混合燃烧产生高温高压燃气、高温高压燃气推动透平膨胀做功三个阶段。燃机具有启动迅速的特点，从冷态启动到满负荷运行通常仅需几分钟到十几分钟，相比之下，传统汽机启动时间长达数小时甚至更长。这一特性使得燃机在电力系统调峰、备用电源等场景中具有显著优势。此外，燃机的运行效率在部分负荷工况下仍能保持较高水平，能够灵活适应电力负荷的波动变化。

### 1.2 汽机工作原理及特性

蒸汽轮机是以蒸汽为工质，将热能转换为机械能的旋转式动力机械。其工作原理是利用锅炉产生的高温高压蒸汽进入汽轮机，推动叶片带动转子旋转，从而实现能量转换。汽机在设计工况下具有较高的能量转换效率，特别是在大型火电机组中，超临界、超超临界汽机的发电效率可达45%以上。但汽机的缺点在于启动过程复杂、时间长，且变负荷能力相对较弱，频繁启停或大幅度变负荷运行会对设备造成较大损耗，影响设备寿命和安全性。

## 二、燃机汽机协同运行的技术原理

### 2.1 燃气 - 蒸汽联合循环发电系统

燃气 - 蒸汽联合循环发电系统是燃机汽机协同运行的典型应用形式。在该系统中，燃机排出的高温烟气进入余热锅炉，将水加热成蒸汽，驱动汽机发电。这种协同方式充分利用了燃机排气的余热，实现了能源的梯级利用，大幅提高了发电效率。以某大型燃气 - 蒸汽联合循环电站为例，其发电效率可达60%以上，相比传统燃煤电站提升显著。同时，联合循环系统能够快速响应电网负荷变化，燃机可在短时间内启动并承担部分负荷，汽机根据负荷需求逐步投入运行，二者协同配合，有效提升了电力系统的灵活性和稳定性。

### 2.2 机务协同运行机制

在机务层面，燃机与汽机的协同涉及设备的运行控制、维护管理等多个方面。在运行控制上，需要建立精确的协调控制系统，根据电网负荷指令、能源供应情况等因素，合理分配燃机与汽机的负荷。例如，在负荷上升阶段，优先启动燃机快速响应，待负荷稳定后，逐步增加汽机负荷，实现二者的平稳过渡与协同运行。在维护管理方面，制定统一的设备维护计划，对燃机和汽机的关键部件进行定期检测与维护，确保设备处于良好运行状态。同时，通过建立设备状态监测系统，实时掌握燃机与汽机的运行参数，提前发现潜在故障，保障协同运行的可靠性。

## 三、燃机汽机协同在能源电力行业的应用场景

### 3.1 常规火电领域

在常规火电领域，燃机汽机协同运行可用于新建电站和现有电站的升级改造。对于新建电站，采用燃气 - 蒸汽联合循环发电技术，能够提高能源利用效率，降低污染物排放。在现有燃煤电站改造中，通过加装燃机，与原有的汽机系统形成协同，可在不增加过多占地面积的情况下，提升电站的整体性能，增强调峰能力。例如，某老旧燃煤电站经过燃机汽机协同改造后，发电效率提高了8%，调峰能力提升了30%，同时氮氧化物、二氧化硫等污染物排放显著降低。

### 3.2 分布式能源系统

分布式能源系统以用户需求为导向，就近布置能源供应设施。燃机汽机协同在分布式能源系统中具有广泛的应用前景。在工业园区、商业综合体等场景中，利用燃气 - 蒸汽联合循环系统实现热电联产，不仅能够满足用户的电力需求，还能提供工业蒸汽和生活热水，提高能源综合利用效率。以某工业园区分布式能源站为例，采用燃机汽机协同的热电联产模式，能源综合利用率达到80%以上，相比传统分供模式，大幅降低了能源消耗和运行成本。

### 3.3 可再生能源消纳场景

随着风电、光伏等可再生能源的大规模接入，电力系统面临着调峰困难等问题。燃机汽机协同可作为灵活调节电源，有效消纳可再生能源。当可再生能源出力充足时，燃机和汽机可降低负荷运行或停机；当可再生能源出力不足时，迅速启动燃机并逐步投入汽机，弥补电力缺口。通过这种方式，实现了可再生能源与传统能源的协同互补，提高了电力系统对可再生能源的消纳能力，增强了系统的稳定性和可靠性。

## 四、燃机汽机协同运行面临的挑战

### 4.1 技术层面挑战

燃机与汽机的协同运行涉及多种复杂技术的集成，对设备的匹配性和系统的控制精度要求较高。不同型号的燃机和汽机在热力参数、运行特性等方面存在差异，如何实现二者的最佳匹配是技术难点之一。此外，协同运行过程中，系统的动态响应特性复杂，需要先进的控制策略和算法来实现精准控制，以确保系统的稳定运行。同时，余热锅炉的性能直接影响联合循环系统的效率，如何提高余热锅炉的热交换效率和可靠性，也是需要解决的技术问题。

### 4.2 经济层面挑战

燃机汽机协同运行系统的建设和运维成本较高。燃气轮机设备价格昂贵，且对燃料品质要求较高，运行成本相对较大。在项目建设初期，需要大量的资金投入用于设备采购、安装调试等。在运维阶段，由于燃机和汽机的技术复杂性，对运维人员的专业素质要求较高，运维成本也相应增加。此外，能源市场价格波动较大，燃气价格的上涨会直接影响燃机汽机协同运行的经济性，降低项目的投资回报率。

### 4.3 管理层面挑战

燃机汽机协同运行涉及多个设备和系统的协同管理，对企业的管理水平提出了更高要求。在运行管理方面，需要建

立跨部门、跨专业的协同工作机制,实现设备运行数据的共享和协同分析。在安全管理方面,燃机和汽机的运行涉及高温、高压等危险因素,需要制定完善的安全管理制度和应急预案,确保设备和人员的安全。同时,政策法规的变化也会对燃机汽机协同运行项目产生影响,企业需要及时了解和适应相关政策,保障项目的合规运营。

## 五、优化燃机汽机协同运行的措施与建议

### 5.1 技术优化措施

在燃机与汽机协同运行体系中,匹配技术的深化研究是提升系统效能的关键路径。通过构建高精度的仿真模型,基于 MATLAB、Aspen Plus 等专业软件平台,对不同功率等级、技术参数的燃气轮机与蒸汽轮机进行多维性能分析。研究涵盖变工况运行特性、负荷调节范围、热力循环匹配度等维度,通过参数敏感性分析确定最优匹配方案,进而实现系统整体效率的提升。

在控制系统层面,引入智能控制算法已成为行业技术革新的重要方向。模型预测控制(MPC)技术通过建立系统动态模型,对燃机汽机的运行状态进行多步预测,并根据负荷需求与能源价格变化,实时优化调节策略。模糊控制算法则针对系统复杂非线性特性,构建模糊规则库实现自适应控制,有效提高系统面对负荷突变时的动态响应速度,同时增强运行稳定性。在关键设备研发方面,余热锅炉作为能量回收核心装置,需重点改进管排布置、受热面结构及烟气流动特性,采用螺旋鳍片管、膜式壁等新型换热技术,配合智能吹灰系统,将余热回收效率提升至行业领先水平。

### 5.2 经济优化措施

政策引导与市场机制的协同发力是燃机汽机协同项目实现经济可行性的重要保障。政府层面,可参照可再生能源补贴政策,制定阶梯式财政补贴方案,对采用先进协同技术、达到能效标准的项目给予设备投资补贴与运营电价补贴。同时,通过税收优惠政策,减免增值税、企业所得税等,降低项目全生命周期成本。在市场风险管控方面,能源企业应强化与天然气供应商的战略合作,采用“基准价+浮动价”的长期供气合同模式,结合期货市场套期保值工具,对冲天

然气价格波动风险。

企业内部需构建精细化的运营管理体系,通过数字化运维平台实现设备全生命周期管理。运用大数据分析技术,优化机组启停策略与负荷分配方案,提高设备利用小时数;引入能源管理系统(EMS)实现能源流的实时监测与优化调度,降低厂用电率。此外,探索热电联产、冷热电三联供等多能互补商业模式,通过电力市场现货交易、辅助服务市场参与等途径,拓宽收益渠道,提升项目整体经济性。

### 5.3 管理优化措施

高效的管理体系是保障燃机汽机协同运行项目持续稳定的基础。企业需建立涵盖生产、技术、安全、财务等多部门的协同管理架构,通过制定标准化作业流程(SOP)与岗位责任矩阵,明确各部门在项目规划、设备运维、应急处置等环节的职责边界。同时,搭建跨部门协作平台,运用数字化协同工具实现信息共享与快速响应,打破部门壁垒。

人才培养与知识管理对技术创新与运维保障至关重要。企业应制定分层分类的培训体系,针对运维人员开展燃机汽机协同运行原理、智能控制技术、故障诊断等专项培训,通过实操演练与技能竞赛提升其专业能力;建立技术专家库与知识共享平台,促进经验传承与技术创新。此外,设立政策研究部门,实时跟踪能源转型、碳排放管理等政策动态,主动与政府部门、行业协会开展沟通交流,提前布局技术升级与商业模式创新,确保项目在政策框架内实现可持续发展。

## 六、结论

燃机汽机协同运行在提升电力系统效能方面具有显著优势,通过在能源电力行业的多种应用场景中实现二者的协同,能够有效提高能源利用率、增强电力系统的稳定性和灵活性。然而,燃机汽机协同运行也面临着技术、经济和管理等多方面的挑战。通过采取技术优化、经济优化和管理优化等措施,能够进一步提高燃机汽机协同运行的效率和可靠性,推动电力行业向高效、清洁、可持续发展的方向发展。未来,随着技术的不断进步和政策的持续完善,燃机汽机协同运行将在能源电力领域发挥更加重要的作用。

## 参考文献

- [1]徐钢,杨勇平,刘吉臻。燃气-蒸汽联合循环发电系统性能分析与优化[J].中国电机工程学报,2010,30(26):1-7.
- [2]朱明善,林汝谋,刘宝岩。区域能源系统中燃气-蒸汽联合循环的应用分析[J].热能动力工程,2012,27(3):277-282.
- [3]岑可法,姚强。能源清洁转化与高效利用技术[M].北京:高等教育出版社,2015.
- [4]倪维斗,李政。工程热力学[M].北京:中国电力出版社,2018.
- [5]周云龙。汽轮机原理[M].北京:中国电力出版社,2017.
- [6]郭晓克,王树民。燃气轮机发电技术及其应用[J].电力设备,2011,12(4):1-5.
- [7]谭浩,赵勇。分布式能源系统中燃气-蒸汽联合循环的优化运行研究[J].能源研究与信息,2014,30(2):75-80.
- [8]刘金福,陈海生。可再生能源消纳与传统能源协同优化策略[J].电力系统自动化,2016,40(18):1-7.