

燃气蒸汽联合循环机组运行经济性分析

童 昊

大唐惠州热电有限责任公司 广东 惠州 516123

【摘要】：燃气蒸汽联合循环机组兼具启停灵活、能量梯级利用和低排放优势，但其运行经济性受燃料价格、电价机制、负荷曲线、启停方式、冷端状态、余热利用和设备性能衰减等多重因素影响。文章从机组运行经济性的构成入手，分析负荷率、启停过程、热力系统损失和辅助系统能耗对成本收益的作用机制，提出以负荷优化、启停精细化、能耗诊断、设备协同和管理闭环为核心的改进路径。联合循环机组经济运行不能只追求单点效率，而应围绕市场收益、热耗水平、设备寿命和供热供电边界建立综合评价体系。

【关键词】：燃气蒸汽联合循环；运行经济性；热耗分析；节能优化；机组管理

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.048

引言

燃气蒸汽联合循环机组通过燃气轮机发电、余热锅炉回收排气热量、蒸汽轮机再次做功，实现能量梯级利用。随着电力市场交易、调峰需求和能源价格波动加剧，机组经济性已不再只是设计热效率问题，而是运行策略、设备状态和市场机制共同作用的结果。两部制电价背景下，不同等级燃气蒸汽联合循环机组的容量收益、发电收益与燃料成本之间存在明显耦合关系。如果运行人员只关注短时负荷响应，而忽略启停代价、辅助系统能耗和设备退化，机组可能在表面发电量增加的同时降低整体收益。因此，开展运行经济性分析具有较强现实意义。

1 燃气蒸汽联合循环机组经济性的构成逻辑

1.1 燃料成本与负荷收益的耦合

联合循环机组经济性首先受燃料成本影响。天然气价格波动会直接改变边际发电成本，电价和供热价格则决定机组输出能否转化为有效收益。对于运行管理而言，不能简单地把高负荷等同于高收益，因为机组在不同负荷区间的热耗、厂用电率、排烟损失和设备效率并不相同。当市场电价较高且燃料供应稳定时，维持较优负荷区间有利于摊薄固定成本；当电价偏低或调峰频繁时，盲目追求出力反而可能增加燃料消耗与启停磨损。经济性分析应把单位发电燃料成本、容量补偿、调峰收益、供热收益和设备寿命折损放在同一框架内比较^[1]。只有看清收入与成本的对应关系，运行人员才能判断某一负荷安排是“多发多赚”，还是“多发少赚”。

1.2 热力效率与系统损失的传递

燃气轮机、余热锅炉和蒸汽轮机之间存在明显的能量传递关系。燃气轮机排气状态决定余热锅炉可利用热量，余热锅炉换热效果影响蒸汽参数，蒸汽轮机效率又会反过来影响联合循环整体热耗。任何一个环节偏离经济工况，都会沿系统链条放大。例如进气条件变差、压气机积垢、排烟温度偏高、凝汽器真空下降或循环水系统运行不合理，都可能使同样燃料投入对应的上网电量下降。运行经济性诊断不能只看单台设备，也要

看能量流从燃气侧到蒸汽侧的传递是否顺畅。针对运行过程开展热经济性诊断和仿真分析，有助于识别热力系统中被常规运行报表掩盖的损失环节^[2]。

2 影响机组运行经济性的关键因素

2.1 负荷率变化带来的效率偏移

负荷率是影响联合循环机组经济性的核心因素之一。机组通常存在相对经济的负荷区间，过低负荷下燃气轮机效率下降，余热锅炉吸热能力不足，蒸汽侧出力受限，厂用电占比上升；过高负荷下虽然发电量增加，但部分设备可能接近约束边界，冷端、燃料调节和环保控制压力同步增大。调峰运行使机组频繁在不同负荷区间切换，经济性评价就不能只看某一时刻的热耗，而要看一个运行周期内的平均收益和平均损失。燃气联合循环机组在不同运行特性下，能耗分布和节能优化重点会随负荷变化而调整^[3]。运行人员应结合市场曲线、设备状态和供热需求，寻找能够兼顾响应速度与热耗水平的负荷组合。

2.2 启停过程中的隐性成本

启停过程是联合循环机组经济性管理中容易被低估的环节。冷态启动需要较长暖机、升温 and 并网准备时间，燃料消耗、辅机运行、蒸汽参数建立和排放控制都会带来成本；热态启动虽然时间较短，但如果操作节奏不合理，同样可能造成燃料浪费和设备热应力增加。频繁启停还会影响燃机热部件、余热锅炉受热面、汽轮机转子和阀门系统寿命，形成难以在当日收益表中直接体现的折损。特定型号机组冷态启动中，启动曲线、辅机提前投入时机和并网策略会共同改变过程消耗^[4]。启停经济性不能只看一次启动消耗多少燃料，还要把启动成功率、并网时点、设备寿命和后续负荷爬升能力统一纳入评估。

2.3 冷端与辅助系统能耗

冷端系统和辅助系统经常被视为配套环节，但它们对经济运行的影响十分直接。凝汽器真空下降会降低蒸汽轮机做功能力，循环水泵、凝结水泵、闭式水系统和风机运行方式不合理，会增加厂用电消耗。尤其在季节变化、供热工况切换或水温偏

高时，冷端系统若仍沿用固定运行方式，可能出现多台设备低效并列、调节裕度不足或局部换热恶化。汽轮机冷却系统的运行方式，会影响主机效率之外的辅助能耗和经济运行空间^[5]。运行管理应把冷端真空、循环水温差、泵组组合、阀门开度和换热端差纳入日常分析，而不是只在故障后处理。

2.4 供热边界与综合能源收益

当联合循环机组承担供热任务时，经济性评价会更复杂。供热可以提高能源综合利用程度，但也会改变蒸汽侧做功条件、汽轮机排汽状态和机组负荷分配。若供热价格、热网需求和电价机制匹配较好，供热工况可能提升综合收益；若热负荷波动大、回水条件差或抽汽调节不协调，则可能压缩发电收益并增加运行调整成本。联合循环系统中的余热资源只有与实际负荷和利用场景匹配，才能转化为较稳定的运行收益^[6]。供热经济性不能只看热量是否被利用，还要看利用后是否降低了整体能耗、是否影响电力交易收益、是否增加设备运行约束。

3 运行经济性优化的实施路径

3.1 建立多工况经济运行基准

经济运行优化需要先有清晰的基准。电厂可按照季节、负荷、供热状态、环境温度和燃料条件建立多工况样本，把热耗、厂用电、启动耗量、关键参数偏差和收益指标统一记录。基准不应只是设计值或厂家曲线，而应来源于机组自身的长期运行数据。通过对比相近环境和负荷条件下的历史表现，可以识别当前运行是否偏离经济区间。对于偏差明显的工况，应进一步判断是燃机侧效率下降、蒸汽侧换热不足、冷端恶化，还是运行方式选择不当。基准建立后，班组调度就有了可参照的“经济地图”：什么工况适合快速升负荷，什么工况需要避免长时间低负荷，什么工况适合安排清洗、检修或辅机组合调整。基准还应定期更新，不能长期沿用机组投产初期的状态。随着设备老化、检修质量变化、热网接入方式变化和市场价格波动，原先的经济点可能发生迁移，只有把基准滚动校正，运行优化才不会停留在旧经验里。

3.2 优化负荷分配与启停策略

在多台机组并列运行或承担调峰任务时，负荷分配应从全厂收益出发，而不是让各机组平均承担。效率较高、状态较好的机组可优先处于经济负荷区间，状态较差或刚完成检修验证的机组则应避免频繁大幅波动。启停策略方面，应根据电价预测、供热需求、燃料供应和设备状态综合判断，尽量减少无效启停和短周期启停。热态启停过程中，参数控制、并网时点和升负荷节奏会影响燃料消耗与运行收益^[7]。实际管理中，可将启动曲线细化为班组可执行的检查点，明确辅机投入顺序、升温升压节奏、并网后负荷爬升和异常回退条件，使启停过程从经验操作转向可复盘、可比较、可优化。同时，应结合历史运行数据建立典型工况库，对不同负荷组合和启停路径的经济性

进行量化评估，逐步形成标准化调度策略。机组启停策略优化流程见图 1 所示。

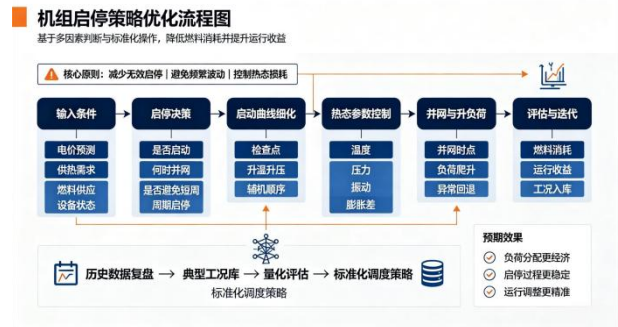


图 1 机组启停策略优化流程图

3.3 开展热耗偏差诊断与设备协同调整

热耗偏差诊断应围绕能量流展开。运行人员可从燃气轮机进排气状态、余热锅炉换热效果、蒸汽参数、凝汽器真空、给水系统和循环水系统逐项排查，判断偏差产生于哪一环节。若只看到总热耗升高而不分解原因，容易把所有问题都归结为燃料质量或环境温度，错过设备调整机会。设备协同调整强调主机、辅机和热网之间的联动，例如燃机负荷变化后，余热锅炉给水调节、蒸汽旁路、循环水泵组合和凝汽器清洁状态都要同步匹配。循环水系统中，辅机组合和水侧调节优化能够降低运行损失，并改善联合循环系统整体效率^[8]。经济性优化不能只依赖单次检修，更要依靠日常诊断把小偏差及时纠正。

3.4 完善运行管理闭环和人员协同

运行经济性最终要落实到管理闭环。电厂可建立“计划、执行、分析、纠偏”的工作机制：运行前根据市场和设备状态制定经济运行计划，在运行中记录关键参数和调整原因，运行后对收益、热耗和异常偏差进行复盘，再把有效措施固化为操作标准。人员协同同样重要，运行、检修、燃料、营销和热网调度之间应共享信息，避免各部门只优化自己的局部指标。比如营销侧掌握电价窗口，运行侧掌握机组状态，检修侧掌握设备缺陷，燃料侧掌握气源变化，只有这些信息互通，经济运行决策才不会滞后。管理闭环还应设置问题追踪台账，对长期反复出现的真空偏低、排烟温度异常、泵组效率下降等问题明确责任、期限和验证方式。经济性优化不是一次专项活动，而是持续改进的运行习惯。为了避免闭环流于形式，还应把每次优化措施的执行条件写清楚，区分可长期固化的操作、只适合特定季节的措施以及需要检修配合的项目。见图 2 所示。



图2 完善运行管理闭环和人员协同框架图

4 经济运行评价与风险控制

4.1 从单一热耗转向综合收益评价

传统运行评价容易把热耗作为核心指标,这对识别能效水平很有价值,但不足以完整反映市场化环境下的机组收益。联合循环机组既可能通过发电获得收益,也可能通过调峰、备用、供热和容量机制获得收益。某些工况热耗并非最低,却能在高价时段或供热需求集中时带来更好综合回报;另一些工况看似节能,却可能错过交易窗口或增加后续启停成本。经济性评价应建立包含燃料成本、发电收益、辅助服务收益、供热收益、厂用电、启动成本和设备折损的综合指标体系。评价结果要能服务调度决策,而不是只在月度分析会上形成静态报表。更可操作的方式,是把评价指标分成运行班组可调、检修部门可改和经营部门可协调三类。班组关注负荷、辅机和参数偏差,检修关注设备缺陷和效率恢复,经营侧关注交易窗口和合同边界,三类指标合在一起,经济性评价才有行动出口,也便于4.2防止过度经济运行带来的可靠性风险

参考文献:

- [1] 吕晗,陈文瑞.两部制电价下 9F 和 9H(J)级燃气-蒸汽联合循环机组经济性分析[J].燃气轮机技术,2025,38(1):15-19.
- [2] 翁文霖,孙玲飞.燃气-蒸汽联合循环机组运行过程热经济性诊断及仿真研究[J].装备维修技术,2023,(3):29-33.
- [3] 席亚宾,李松波.基于 9H 级燃气联合循环机组运行特性的能耗分析与节能优化研究[J].电工技术,2026,(8):4-6+10.
- [4] 程昊极.M701DA 型燃气-蒸汽联合循环机组冷态启动过程的经济性分析[J].电子技术,2023,52(8):346-347.
- [5] 李亚轩.燃气蒸汽联合循环机组汽轮机冷却系统节能分析[J].电力设备管理,2025,(17):287-289.
- [6] 杨基发.M701F4 型联合循环机组天然气调压站低品位热能回收及效益分析[J].工业锅炉,2023,(4):40-43.
- [7] 华趣仪.9F 燃气-蒸汽联合循环机组热态启停经济性分析及优化[J].中国设备工程,2023,(11):106-108.
- [8] 王展良.9F 燃气蒸汽联合循环机组循环水系统节能优化与应用[J].技术与市场,2023,30(9):19-23+27.

追求经济性不能以牺牲安全可靠为代价。若为降低短期成本而压缩检修窗口、减少试验、让设备在边界条件下运行,可能导致故障概率上升,带来更大停机损失。运行优化必须结合现场设备状态与人员操作能力。联合循环机组中,燃机热通道、余热锅炉受热面、蒸汽轮机振动、冷端换热及电气保护均关乎连续运行安全。经济运行应在约束条件内进行,凡涉及设备保护、环保排放、供热安全及电网调度指令的边界,不得为短期收益随意突破。应先明确安全红线,再在允许范围内寻找经济区间。对临近边界的优化建议,须先小范围验证并专人监视,确认趋势稳定后再扩大应用。若经济指标改善伴随振动、温度、压差或排放趋势恶化,应立即退出。风险控制应形成反馈机制,记录退出原因及恢复条件,供后续负荷安排与检修策划参考,避免同类风险重复发生。

5 结语

燃气蒸汽联合循环机组运行经济性是燃料成本、负荷收益、热力效率、启停代价、辅助系统能耗和市场机制共同作用的结果。经济运行管理应从单点节能转向系统优化,既要识别燃机、余热锅炉、汽轮机和冷端系统中的能量损失,也要把电价、供热、调峰和设备寿命纳入综合判断。通过建立多工况基准、优化负荷与启停策略、开展热耗偏差诊断、完善管理闭环,机组可以在保证安全可靠的前提下提升综合收益。未来,随着数据平台和智能诊断能力增强,联合循环机组经济性分析将更加依赖实时数据、跨专业协同和面向市场的动态决策,并促使运行管理从事后统计逐步转向事前预判和过程修正,更贴近现场收益目标,也更利于形成稳定有效的经济运行规范。