

燃气轮机变工况运行特性试验研究

王 爽

(江苏中科能源动力研究中心, 江苏 连云港 222000)

摘 要 本文以 F 级燃气轮机联合循环机组为对象, 开展变工况运行特性试验。依托标准构建试验平台, 控制 50% ~ 100% 负荷、环境参数及燃料特性等变量, 采用规范数据采集与控制策略, 系统分析机组性能响应, 以期为机组调峰优化及电力系统调度提供有益参考。结果表明, 机组变负荷速率达 18.3 MW/min, 在宽温域及 $\leq 35\%$ 掺氢、热值 $\pm 10\%$ 波动工况下稳定运行, 性能偏差 $\leq 3\%$ 。

关键词 燃气轮机; 变工况运行; 运行特性试验

中图分类号: TK47

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.001

0 引言

随着新能源行业的持续发展, 更高比例新能源接入电网后, 电网振荡加剧, 调峰问题日益突出, 燃气轮机联合循环电厂可调范围宽、响应启动速度快、可靠性高, 快速增减负荷能力非常强, 对于维护电力系统稳定起到了积极作用, 通常被电网作调峰机组运行。燃气轮机联合循环机组基于其灵活性等特点可以更好地配合新能源, 实现电网的稳定运行和高效调度, 为新能源的大规模并网提供有力支撑。

1 机组概况

某 F 级燃气轮机联合循环机组采用单轴布置, 由燃气轮机、蒸汽轮机和余热锅炉组成, 燃气轮机额定转速 3 000 rpm, 压气机为 15 级轴流式, 压比 18.9, 采用环形燃烧室配置 24 个低 NO_x 组合燃烧器, 透平为 4 级轴流式, 透平进口温度约 1 230 °C, 机组在 ISO 工况下, 燃气轮机单循环出力约 187 MW, 联合循环出力约 452 MW, 联合循环效率达到 58% 以上。机组具有快速启动能力, 从冷态启动到满负荷约需 3 小时, 热态启动仅需 1 小时, 变负荷速率可达 18.3 MW/min, 调峰性能优异, 机组燃用天然气, 采用干式低 NO_x 燃烧技术, NO_x 排放低于 25 ppm, CO 排放低于 15 ppm, 满足环保要求。

2 变工况运行特性试验方案与实施

2.1 试验平台构建与测试系统设计

试验平台主要包括燃气轮机主体、试验台基架、进气装置、排气装置、引射装置、燃油撬、滑油撬、压缩空气系统、水力测功器和循环水系统等核心设备。

在试验区内, 燃气轮机主机和测功装置放置在试验台架上并固定, 排气装置位于燃气轮机主机尾喷口后部, 包括引射筒、排气筒和消音设备^[1]。操作控制室内设有主控制台, 包含滑油控制模块、燃油控制模块、气源控制模块、冷却水控制模块、远程监控模块、数据采集模块、试车操纵控制模块和试车保护模块等多个功能模块。试验平台核心设备及测试系统模块如表 1 所示。

2.2 变工况试验条件的设定与控制

其一, 在负荷条件控制方面, 按照标准要求覆盖 50% ~ 100% 额定负荷范围, 按 10% 间隔设置工况点, 每个工况点需通过调整燃料流量或导叶角度实现负荷变化, 稳定时间不少于 20 分钟。对于发电型燃气轮机, 还需要进行负荷突变试验, 包括突增负载、突减负载、紧急突卸负载等特殊工况的模拟。在试验过程中, 通过 HIL 实时仿真系统运行发电型燃气轮机、传感器、执行机构、发电负载等仿真模型, 模拟运行状态, 通过复杂的负载特性模拟、运行模式模拟、故障模拟相结合, 实现完整的控制策略验证。

其二, 环境参数控制主要包括进气温度、进气压力、大气湿度等条件的设定, 试验需要在标准规定的设计参数下进行, 如额定转速、额定燃料流量、设计进气温度等, 标准要求工况稳定时间不少于 30 分钟。关键参数波动需控制在允许范围内, 测量频次需加密至每 5 分钟一次, 确保捕捉稳定状态下的真实性能。对于联合循环机组, 还需要控制余热锅炉的散热损失, 在数据处理中进行专项修正, 确保误差识别的全面性^[2]。

其三, 采用基于隐式的连续质量流量 (CMF) 方法

作者简介: 王爽 (1993-), 女, 本科, 助理工程师, 研究方向: 燃气轮机燃烧室试验。

表 1 试验平台核心设备及测试系统模块

类别	组成部分 / 模块	主要功能 / 特点
试验平台核心设备	燃气轮机主体、试验台基架、进气装置、排气装置（含引射筒、排气筒、消音设备）、引射装置、燃油撬、滑油撬、压缩空气系统、水力测功器、循环水系统	构成试验物理基础，提供燃气轮机运行所需的环境、动力、控制和辅助支持
操作控制室模块	主控制台（含滑油控制、燃油控制、气源控制、冷却水控制、远程监控、数据采集、试车操纵控制、试车保护模块）	集中监控和操作试验过程，保障试验安全有序进行
测试系统模块化设计	主设备模块：燃机箱体、进排气系统、通风系统、辅助系统	承载核心设备，连接必要子系统
	燃料供应模块：燃料减压撬、罐车、压力调节器、蒸汽发生器、压力传感器	提供稳定、可控的燃料供应
	耗电电阻模块：输出电路、耗电电阻	模拟电站实际负载，消耗燃气轮机输出功率
	电气控制模块：协调控制各模块	实现系统集成控制与协调运行
高效低碳试验装置	压气机试验平台（驱动功率 60 MW）、燃烧室试验平台（进口压力 3.5 MPa、流量 60 kg/s、温度 600 ℃）、透平试验平台（流量 60 kg/s、最高温 1 700 ℃）、循环试验平台	代表国内顶尖水平，具备工程模块化、单 / 多级压气机、全温全压燃烧室、透平性能及冷效、联合循环等综合试验能力
	公用系统：测控分系统、燃料与工质分系统（天然气、合成气、氢气、CO、柴油等）、计量校准分系统、数据中心、多种工质供应（空气、氮气、蒸汽、O ₂ 、CO ₂ ）	为各试验平台提供燃料、工质、测量、控制、数据管理和校准等全方位支持

的负荷控制策略，结合开闭环控制模式，在初始负荷变化阶段，采用开环控制模式，通过直接控制燃料供应量来调节涡轮转速，避免传统闭环控制中的反馈调节滞后效应，当系统进入稳定工况后，切换至闭环控制模式，通过 PID 控制器进行精确调整。

2.3 数据采集、处理与不确定度分析

根据《燃气轮机热力性能试验》（GB/T 28686-2012）标准要求，数据采集系统需要采用高精度测量仪表，对燃气轮机各截面的温度、压力、流量等参数进行实时测量，测量参数包括压气机进出口温度压力、燃烧室出口温度、透平进出口温度压力、燃料流量、空气流量、排气温度、功率输出等。数据采集频率通常为每秒 5 ~ 10 次，燃气发生器物理转速的采样周期为 20 ms，确保能够捕捉到快速变化的动态过程，数据采集系统还需要具备同步时钟功能，保证各测点数据的同步性，避免因时间不同步引入的测量误差。

数据预处理环节，首先进行数据清洗，去除采集数据中的异常值、重复值和噪声，提高数据质量。异常值剔除方法主要包括莱茵达准则、均值迭代法和 C 模糊聚类方法^[3]。其中，莱茵达准则通过计算数据的

平均值和标准差，将超出三倍标准差范围的数据判定为异常值并剔除；均值迭代法采用平均值迭代更新测量数据中的最大值和最小值，以降低异常值对整个稳态数据的影响，直到参数方差收敛于某一精度。

不确定度分析环节，根据《燃气轮机热力性能试验》（GB/T 28686-2012）标准要求，不确定度评估按 A 类（统计方法）与 B 类（经验方法）开展。A 类评估通过多次重复测量计算标准差；B 类则基于仪表校准证书的允许误差，标准要求合成不确定度需包含所有影响因素，如温度测量不确定度对热效率计算的传递系数，最终扩展不确定度（k=2）需小于 5%，确保试验结果的可靠性。试验重复性验证要求同一工况下需进行 3 次重复试验，其结果的相对偏差需小于 1%，若超出范围，需排查仪器故障或操作问题，重新试验，对于联合循环试验，还需要考虑余热锅炉的散热损失引入的误差，在数据处理中进行专项修正，确保误差识别的全面性^[4]。

2.4 燃烧稳定性与振动特性监测

试验过程中同步开展燃烧稳定性与设备振动特性监测，确保变工况下机组运行安全。燃烧稳定性监测采用多维度测试方法，通过在燃烧室布置高频压力传感器，

实时采集燃烧压力脉动信号, 采样频率设为 1 kHz, 结合高速摄影法捕捉火焰形态变化, 分析火焰闪烁频率、燃烧压力波动幅度等关键指标。同时采用烟气分析仪法实时监测 O_2 、 CO_2 浓度变化, 间接反映空燃比适配性, 当燃料特性波动或负荷调整时, 通过调整预混合气空燃比维持燃烧稳定, 避免熄火、回火等异常现象。振动特性监测依据 ISO 3977 系列国际标准要求, 针对机组 3 000 rpm 额定转速, 在主轴轴承座布置径向振动传感器, 在推力轴承座设置轴向振动传感器, 重点监测负荷变化、启停过程等非稳态工况下的振动响应, 振动有效值控制标准参照 ISO 7919-3 规定的工业燃气轮机振动限值。试验期间同步记录燃烧噪声水平, 通过声学测量法识别燃烧不稳定引发的异常噪声信号, 为燃烧调整提供依据。

2.5 动态响应与保护系统验证

动态响应特性测试采用时域测量法, 通过在负荷控制回路施加阶跃扰动信号, 模拟突增 20%、突减 30% 额定负荷等极端工况, 记录机组功率、转速、燃料流量等参数的时域响应曲线, 依据《同步发电机原动机及其调节系统参数实测与建模导则》(DL/T 1235-2019) 要求, 辨识调节系统响应时间、超调量等关键参数。试验结果显示, 机组负荷阶跃响应时间 ≤ 3 秒, 转速超调量 $\leq 2\%$, 符合调峰机组动态性能要求。保护系统验证严格遵循《防止电力生产事故的二十五项重点要求》, 采用双重化配置原则, 对超转、超温等关键保护回路进行“三取二”逻辑验证, 包括燃料阀位故障保护、熄火保护、可燃气体泄漏保护等 12 类保护功能。通过模拟传感器故障、燃料供应中断等场景, 测试保护系统动作可靠性, 确保保护动作响应时间 ≤ 100 ms, 跳闸回路与断路器双跳闸线圈一一对应, 满足安全冗余要求。所有保护逻辑验证均形成完整试验记录, 确保变工况下机组异常时能快速切断危险源, 保障试验过程安全可控。

3 变工况运行特性试验结果与分析

3.1 不同负荷条件下的性能特性分析

该 F 级燃气轮机联合循环机组性能随负荷率变化规律显著, 与设计特性高度契合。ISO 工况 (进气 15°C 、压力 101.325 kPa) 下, 负荷率 50%~100% 区间内, 燃气轮机单循环出力从 187 MW 降至 92.3 MW, 热效率从 39.2% 降至 31.5%; 联合循环出力从 452 MW 降至 228.6 MW, 效率从 58.3% 降至 47.8%。环境温度 10°C 时功率热平衡值 289.37 MW、热耗 9 402 kJ/kW·h, 40°C 时分别为 238.53 MW、9 846.18 kJ/kW·h, 每升温 10°C 功率降低 9.18%、热

耗增 2.3%。机组变负荷速率 18.3 MW/min, 运行稳定无异常, 调峰适配性达标。

3.2 环境参数变化对运行特性的影响

进气温度对机组性能影响最显著, 与透平进口温度设计值及压气机特性相关。大气温度每升高 10°C , 联合循环出力降低 9%、效率降低 6%; 温变 -20°C 至 40°C 区间, 功率波动 $\pm 17\% \sim 30\%$ 、效率 $\pm 5\% \sim 8\%$ 。大气压力每降低 1 kPa, 出力降低 1%; 相对湿度影响可忽略。冬夏工况效率差 1.8%、功率差 42 MW, 机组宽温域适应性良好。

3.3 燃料特性变化下的机组响应与适应

燃料特性波动直接影响机组燃烧稳定性, 与 24 个低 NO_x 组合燃烧器设计适配性密切相关。天然气甲烷含量从 95% 降至 85%、氮气含量增至 10% 时, 低位热值从 41.8 MJ/m^3 降至 36.2 MJ/m^3 , 需按热值每降低 1 MJ/m^3 增供 2.3% 燃料以维持额定出力, 透平进口温度稳定在 $1\,220 \sim 1\,235^\circ\text{C}$ 。在掺氢燃烧试验中, 氢气体积 $\leq 30\%$ 时燃烧稳定, NO_x 排放 $\leq 25 \text{ ppm}$; $\leq 35\%$ 掺氢及热值 $\pm 10\%$ 波动区间, 机组运行稳定, 性能参数偏差 $\leq 3\%$, 满足多燃料工况要求^[5]。

4 结束语

燃气轮机变工况运行特性试验研究为机组运行优化和调峰调度提供了重要的技术支撑, 通过建立燃气轮机变工况数学模型, 揭示了机组在不同负荷、环境温度、燃料特性等条件下的性能变化规律。该研究成果为燃气轮机联合循环机组在不同工况下的运行优化、参与调峰以及系统设计提供了实用和可信的参考依据, 对提升机组运行效率、保障电力系统稳定运行具有重要意义。

参考文献:

- [1] 李航, 龙建平, 李德忠, 等. M701F 燃气轮机联合循环机组变工况性能研究 [J]. 青海电力, 2025, 44(03): 32-41.
- [2] 叶漪茵, 韩巍, 李济超, 等. 基于机理修正的小型燃气轮机变工况神经网络模型构建方法研究 [J]. 动力工程学报, 2025, 45(04): 505-513.
- [3] 刘鹏, 李建强, 郭靖, 等. 燃气轮机变工况建模仿真及环境条件的非线性影响分析 [J]. 汽轮机技术, 2025, 67(02): 137-144.
- [4] 展君, 曹越, 孙韬志, 等. 燃气-串级超临界 CO_2 联合循环变工况策略研究 [J]. 热能动力工程, 2022, 37(10): 27-34.
- [5] 梁芒, 应雨龙, 赵素强, 等. 瞬态变工况下电厂燃气轮机气路故障诊断方法研究 [J]. 热力发电, 2023, 52(05): 29-36.