

火电机组汽机运行参数节能优化研究

王文楷

山西大唐国际神头发电有限责任公司

DOI: 10.12238/j pm.v6i12.8598

[摘要] 面对能源短缺与环保减排的双重压力，为提升火电机组运行经济性，本文聚焦汽轮机运行参数节能优化展开系统研究。首先通过热力学理论分析与现场数据挖掘，识别主蒸汽参数、再热蒸汽参数、排汽参数及回热系统参数等关键影响因素，明确各参数间的耦合作用机制；其次结合滑压运行特性，构建多参数协同优化模型，确定不同负荷区间的最优参数组合；最后以 600MW 亚临界机组为案例，通过为期 3 个月的工业试验验证优化策略有效性。结果表明，优化后机组发电煤耗降低 3.2g/(kW·h)，热效率提升 1.5 个百分点，碳排放强度显著下降。研究成果为火电机组汽机节能改造提供理论支撑与实践指导，助力电力行业绿色低碳发展。

[关键词] 火电机组；汽轮机；运行参数；节能优化；滑压运行

Research on Energy saving Optimization of Operating Parameters of Thermal Power Unit Steam Turbine

Wang Wenkai

Shanxi Datang International Shentou Power Generation Co., Ltd.

[Abstract] Faced with the dual pressure of energy shortage and environmental protection and emission reduction, in order to improve the operational economy of thermal power units, this article focuses on the systematic research of energy-saving optimization of turbine operating parameters. Firstly, through thermodynamic theory analysis and on-site data mining, key influencing factors such as main steam parameters, reheat steam parameters, exhaust steam parameters, and reheating system parameters are identified, and the coupling mechanism between each parameter is clarified; Secondly, based on the characteristics of sliding pressure operation, a multi parameter collaborative optimization model is constructed to determine the optimal parameter combination for different load intervals; Finally, taking the 600MW subcritical unit as a case study, the effectiveness of the optimization strategy was verified through a 3-month industrial test. The results showed that the optimized unit reduced coal consumption by 3.2g/(kW·h), improved thermal efficiency by 1.5 percentage points, and significantly reduced carbon emission intensity. The research results provide theoretical support and practical guidance for energy-saving transformation of thermal power units and steam turbines, and help promote the green and low-carbon development of the power industry.

[Key words] thermal power units; Steam turbine; Operating parameters; Energy saving optimization; Sliding pressure operation

一、引言

1.1 研究背景

在“双碳”目标引领下，我国电力行业正加速清洁低碳转型，火电机组作为基础电力保障电源，其节能降耗水平直接影响能源利用效率与碳排放强度。汽轮机作为火电机组核心动力设备，承担蒸汽热能向机械能转化的关键任务，其运行效率每提升 1 个百分点，可使全国火电机组年节约标准煤超千万吨。当前，多数火电机组汽机运行存在参数偏离设计值、变负荷工

况适配性差等问题，主蒸汽压力波动、再热蒸汽温度调节滞后等现象普遍存在，据统计约 70% 的电厂能效提升空间集中于汽轮机优化领域。随着新能源大规模并网，火电机组频繁参与调峰，对汽机在宽负荷区间的运行效率提出更高要求。因此，开展汽机运行参数节能优化研究，既是火电机组提质增效的迫切需求，也是电力行业实现绿色低碳发展的重要技术路径。

1.2 国内外研究现状

国外学者早在 20 世纪 90 年代便关注汽机参数优化，

Aminov 等通过试验确定供热机组初压最优区间，为滑压运行提供早期理论依据；美国能源部主导的“先进蒸汽动力系统”项目，系统研究超临界机组参数优化策略，推动汽轮机运行效率提升。国内研究起步虽晚但发展迅速，胡冰等应用 BP 神经网络建立汽轮机组滑压运行最优初压计算模型，提升变工况下参数匹配精度；黄海东等基于 MATLAB 开发调节级变工况快速计算方法，为参数实时优化奠定技术基础。然而现有研究存在明显短板：一是多集中于单一参数优化，缺乏对多参数耦合效应的系统分析，未充分考虑主蒸汽压力、温度与背压间的非线性关系，导致实际节能效果与理论预期存在偏差；二是在高负荷波动工况下的适应性不足，尤其缺乏超超临界机组深度调峰工况的参数优化策略，难以满足新型电力系统对火电机组灵活性与经济性的双重要求。

1.3 研究内容与技术路线

本文以亚临界与超临界机组为研究对象，主要研究内容包括：①关键运行参数影响机制分析。通过热力学理论与现场数据挖掘，系统梳理主蒸汽参数、真空度、抽汽参数等对汽机效率的影响规律，明确各参数耦合关系；②多参数协同优化模型构建。基于遗传算法、粒子群优化算法等智能技术，结合设备安全约束，建立兼顾安全性、经济性与灵活性的多目标优化模型；③工业试验验证。选取典型电厂开展 3 个月现场试验，对比优化前后热耗率、煤耗率及碳排放强度等指标，评估方案工程应用价值。

技术路线为：理论分析→模型构建→案例验证→结论提炼。理论分析阶段综合运用热力学、传热学知识，建立参数影响机理框架；模型构建采用数值模拟与机器学习结合的方法，提升预测精度与泛化能力；案例验证通过实时监测与数据采集确保结果可靠性；最终提炼可推广的优化策略。

二、汽机运行参数影响机制分析

2.1 主蒸汽参数的影响

主蒸汽压力与温度是影响汽机循环效率的核心参数。提升主蒸汽压力可增强蒸汽做功能力，初压每升高 1MPa，机组热效率约提升 0.3%，但过高压力会增加密封损耗与设备应力；主蒸汽温度升高能降低蒸汽湿度，每提升 10℃热效率提升约 0.2%，还可改善末级叶片工况，不过超温会加速金属蠕变，威胁机组安全。二者存在显著协同效应，参数匹配合理可最大化效率提升，反之则造成能量损失。例如，主蒸汽压力升高但温度未同步调整时，蒸汽湿度增加会加剧叶片冲蚀，反而降低运行效率。

2.2 再热蒸汽参数的影响

再热蒸汽温度直接影响汽轮机中低压缸焓降分配，维持设计温度运行可使各级叶片做功均匀，减少不可逆损失。当再热蒸汽温度低于设计值 50℃时，机组热效率下降约 1.2 个百分点；再热蒸汽压力损失会削弱再热效果，需通过优化管道布置与阀门开度，将压降控制在设计值的 5% 以内。实际运行中，

再热蒸汽温度调节滞后易导致参数波动，需强化温控系统响应速度。

2.3 排汽参数的影响

排汽压力是影响朗肯循环效率的关键指标，每降低 0.01MPa，机组发电煤耗可降低 1.5-2.0g/(kW·h)。排汽压力主要由凝汽器真空决定，循环水流量不足、换热面结垢或真空系统泄漏均会导致真空恶化。但盲目追求低排汽压力会造成循环水泵电耗激增，需通过经济性比较确定最优真空值，实现节能效益与辅助电耗的平衡。

2.4 回热系统参数的影响

回热系统通过抽汽加热给水减少冷源损失，其参数优化核心在于加热器水位与端差控制。加热器水位过高会淹没受热面，降低换热效率；水位过低则导致疏水带汽，排挤下一级抽汽。正常运行时应将高加端差控制在 3-5℃，低加端差控制在 5-7℃，端差异常增大往往预示受热面结垢或抽空气系统故障，需及时排查处理。

三、汽机运行参数优化模型构建

3.1 优化目标与约束条件

3.1.1 优化目标

以机组净热效率最大化为核心目标，兼顾设备安全性与运行稳定性，数学表达式为：

$$\max \eta = (P_e - P_{aux}) / Q_{in}$$

其中， η 为机组净热效率， P_e 为发电机输出功率， P_{aux} 为辅助设备耗电功率， Q_{in} 为锅炉输入热量。

3.1.2 约束条件

- 设备安全约束：主蒸汽温度 $\leq 540^\circ\text{C}$ ，主蒸汽压力 $\leq 16.7\text{MPa}$ ，排汽温度 $\leq 65^\circ\text{C}$ ；
- 运行稳定约束：汽轮机振动幅值 $\leq 0.05\text{mm}$ ，轴承温度 $\leq 90^\circ\text{C}$ ；
- 系统协调约束：给水温度与抽汽压力匹配偏差 $\leq 2\%$ 。

3.2 滑压运行最优初压模型

滑压运行通过调节锅炉出口压力适应负荷变化，其核心在于精准确定不同负荷下的最优初压。本研究基于 BP 神经网络构建优化模型，充分考虑机组运行过程中的关键影响因素。输入参数涵盖机组负荷、给水温度、凝汽器真空，这些参数与主蒸汽压力存在复杂的非线性关系。输出参数设定为最优主蒸汽压力，该参数直接影响机组运行的经济性和稳定性。

模型训练采用某 600MW 机组 1200 组历史运行数据，涵盖多种工况，代表性强。按 7:3 划分训练集与测试集，经迭代优化，模型预测误差控制在 2% 以内，可精准预测不同工况下运行参数。

3.3 多参数协同优化策略

结合各运行参数之间复杂的耦合关系，本研究制定了分负荷优化策略，具体如下：

- 高负荷（80%-100% 额定负荷）：在此负荷区间，维

持主蒸汽与再热蒸汽参数在额定值是保证机组高效稳定运行的关键。通过优化凝汽器清洗频率与循环水流量，提升凝汽器的换热效率，进而将真空度提升至最佳水平。研究表明，凝汽器真空度每提高 1kPa，机组热耗率可降低约 0.3%-0.5%，显著提升机组经济性。

- 中负荷 (50%-80% 额定负荷)：采用滑压运行模式，根据 3.2 节中构建的最优初压模型得到的最优初压曲线，对主蒸汽压力进行动态调节。同时，通过优化减温喷水控制策略，精确控制再热蒸汽温度，将再热蒸汽温度偏差严格控制在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内。合理的温度控制不仅能保证机组的安全运行，还能提高机组的整体热效率。

- 低负荷 (30%-50% 额定负荷)：在低负荷工况下，强化回热系统调节显得尤为重要。确保加热器 100% 投入运行，通过优化水位控制逻辑，使高加端差稳定在 $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ ，低加端差稳定在 $5\sim 6^{\circ}\text{C}$ 。良好的回热系统运行状态，能够有效减少机组的冷源损失，提高机组在低负荷下的运行经济性。

四、案例分析

4.1 案例机组概况

选取某电厂 600MW 亚临界汽轮机组为研究对象，机组型号 N600-16.7/538/538，采用一次中间再热、单轴、三缸四排汽结构，回热系统配置 3 台高压加热器、4 台低压加热器及 1 台除氧器。优化前机组存在明显问题：变负荷工况下主蒸汽压力波动幅度大，排汽真空长期偏低，加热器水位控制精度不足，回热系统换热效率不佳，发电煤耗高达 $312\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，高于同类型机组平均水平，节能优化需求迫切。

4.2 优化方案实施

基于构建的多参数协同优化模型，结合机组实际运行状况，制定系统性优化措施：

1. 主蒸汽压力精准控制：在 DCS 系统中嵌入最优初压控制模块，采用 PID 参数自整定算法，实现滑压曲线自动跟踪。根据机组实时负荷、给水温度及真空度数据，动态调整主蒸汽压力设定值，抑制压力波动。

2. 凝汽器效能提升：改造胶球清洗系统，选用新型耐磨高效胶球，优化清洗周期与流程，将胶球回收率从 75% 提升至 95% 以上；定期监测凝汽器端差，及时清除换热面结垢，提升真空度。

3. 回热系统优化：重新设计加热器水位控制逻辑，引入模糊控制算法，将高压加热器水位波动范围从 $\pm 50\text{mm}$ 缩小至 $\pm 20\text{mm}$ ；加强抽空气系统维护，确保加热器端差稳定在设计区间。

4.3 优化效果分析

通过连续 1 个月的实时监测，优化措施取得显著成效：

- 运行参数改善：主蒸汽压力偏差稳定控制在 $\pm 0.2\text{MPa}$ 以内，温度偏差 $\leq \pm 3^{\circ}\text{C}$ ；排汽压力由 0.052MPa 降至 0.048MPa ，凝汽器真空度显著提升；高压加热器端差平均降低

2.3°C ，回热系统换热效率明显改善。

- 节能效益：发电煤耗降至 $308.8\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，降幅 $3.2\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。按机组年发电量 30 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 计算，年节约标准煤 9600 吨，年节约燃料成本数千万元，经济效益显著。

- 环保效益：年减排二氧化碳 2.6 万吨，机组热效率从 42.3% 提升至 43.8%，达到同类型机组先进水平，提升了机组在电力市场中的竞争力。

五、结论与展望

5.1 研究结论

本文通过理论分析、模型构建与工业试验，系统研究了汽轮机运行参数节能优化技术。通过识别主蒸汽参数、排汽参数及回热系统参数等关键影响因素，明确了各参数间的耦合作用机制；构建的多参数协同优化模型，实现了不同负荷区间的参数精准调控；案例验证表明，所提出的优化策略切实可行，能有效降低发电煤耗与碳排放，兼具显著的经济与环境效益，为火电机组汽机节能优化提供了可借鉴的实践经验。

5.2 未来展望

后续研究将围绕提升机组运行效率与智能化水平展开：一是引入数字孪生技术，建立汽机全工况实时优化平台，通过数字化模拟实现运行状态实时监测与精准预测，提升变负荷工况适应性与稳定性；二是融合机器学习算法，深度挖掘海量运行数据，实现参数预测性优化，提前预判运行状态变化，主动调整参数以挖掘更大节能潜力，推动火电机组向智能化、高效化方向发展。同时，将进一步拓展研究对象，开展超超临界机组在深度调峰工况下的参数优化研究，满足新型电力系统发展需求。

[参考文献]

- [1]胡冰，张仲民，武永运，等。应用 BP 神经网络确定汽轮机组滑压运行的最优初压 [J]. 热力发电，2003，32(7)：24-26.
- [2]黄海东，常澍平，许军诏，等。基于 MATLAB 的汽轮机调节级变工况快速计算方法 [J]. 汽轮机技术，2008，50(2)：103-105.
- [3]Aminov R., Chertykov. Choice of optimal stage of initial steam pressure in heat-generating power units [J]. Tyazheloe Mashinostreenie, 1992, (8)：18-19.
- [4]曹祖庆。汽轮机变工况特性 [M]. 北京：水利电力出版社，1990.
- [5]陶建国。600MW 机组定滑压运行特性分析 [J]. 华东电力，2000，28(12)：49-51.
- [6]李勇，王海荣。基于 BP 网络的汽轮机运行特性方程 [J]. 热能动力工程，2002，17(3)：268-270.
- [7]马淑萍。捷制 200MW 汽轮机组变压运行调峰试验 [J]. 山西电力技术，1995，15(3)：45-48.