

电力行业汽机运行节能技术实践研究

朱自成

国能神皖马鞍山发电有限责任公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i12.8596

[摘要] “双碳”目标推进与能源结构调整进程中，提升火电行业能源利用效率成为关键方向。汽轮机作为火电机组核心能量转换设备，其运行状态对机组整体能耗起决定性作用。本文依据 DL/T2709—2023《汽轮发电机组冷端节能管理导则》，深入分析汽机本体结构改良、冷端系统精准调控、机组运行模式适配优化及余热分级回收等核心节能路径。结合国能费县电厂、华北某 300MW 机组等工程实例，采用理论推演与实测数据佐证相结合的方式，研判各类技术的应用成效。结果显示，单一节能技术可实现 2%—5% 的能效增幅，搭建“本体改良+冷端调控+运行优化+余热回收”的综合体系，能使供电煤耗减少 10g/kW·h 以上，有效提升机组经济与环保效能。研究结论为电力行业汽轮机节能提供兼具理论支撑与实操价值的方案，对助力火电行业节能转型意义深远。

[关键词] 电力行业；汽轮机；节能技术；本体改造；冷端优化；运行调控；余热回收

[中图分类号] TK267

[文献标识码] A

Practical research on energy-saving technology for steam turbine operation in the power industry

Zhu Zicheng

Guoneng Shenwan Ma'anshan Power Generation Co., Ltd.

[Abstract] In the process of promoting the "dual carbon" target and adjusting the energy structure, improving the energy utilization efficiency of the thermal power industry has become a key direction. As the core energy conversion equipment of thermal power units, the operating status of steam turbines plays a decisive role in the overall energy consumption of the units. This article, based on DL/T2709—2023 "Guidelines for Energy saving Management of Cold End of Steam Turbine Generator Units", deeply analyzes the core energy-saving paths of steam turbine body structure improvement, precise control of cold end system, optimization of unit operation mode adaptation, and waste heat classification recovery. Using engineering examples such as Guoneng Feixian Power Plant and a 300MW unit in North China, the application effectiveness of various technologies is evaluated through a combination of theoretical deduction and actual measurement data. The results show that a single energy-saving technology can achieve an energy efficiency increase of 2%—5%. Building a comprehensive system of "body improvement+cold end regulation+operation optimization+waste heat recovery" can reduce coal consumption for power supply by more than 10g/kW·h, effectively improving the economic and environmental efficiency of the unit. The research conclusion provides a solution that combines theoretical support and practical value for energy-saving of steam turbines in the power industry, which has profound significance in helping the energy-saving transformation of the thermal power industry.

[Key words] power industry; Steam turbine; Energy saving technology; Ontology transformation; Cold end optimization; Operational regulation; Waste heat recovery

1 引言

在“双碳”目标与能源结构转型的双重驱动下，火电作为电力系统主力电源，其能效提升成为行业转型核心任务。汽轮机作为火电机组能量转换核心设备，其运行效率直接决定机组能耗水平。根据国家能源局统计数据显示，汽轮发电机组冷端

系统能耗占比达 5%—10%，通流部分损失更是占据汽轮机总损失的 40% 以上。当前行业普遍存在设备老化、运行调控粗放、节能技术应用碎片化等问题，亟需通过系统性的技术创新与精细化管理优化实现节能突破。

本文严格遵循 DL/T2709—2023《汽轮发电机组冷端节能管

理导则》要求，深入系统地分析汽机本体改造、冷端系统调控、运行方式优化等关键节能技术的实践路径。通过引入国能费县电厂、华北某 300MW 机组等多个典型工程案例，采用理论分析与实际数据相结合的方式，对各项技术的实施效果进行全面验证，旨在为电力行业汽机节能提供兼具理论深度与实践价值的可落地解决方案。

2 汽机本体结构优化改造技术实践

2.1 通流部分密封与流场优化

传统梳齿汽封由于其结构特性，存在密封间隙大、漏汽损失严重的固有缺陷，这在一定程度上制约了汽轮机运行效率的提升。蜂窝式汽封凭借独特的迷宫效应，能够显著降低漏汽量，有效提升机组运行效率。在华北某 300MW 机组的改造实践中，高压缸采用蜂窝式汽封后，经过专业测试与数据分析，其效率提升了 2.7 个百分点，按照机组年运行时长与发电负荷计算，年减少标煤消耗约 2100 吨，节能效果十分显著。

在静叶持环改造方面，通过增设导流环优化气流方向，能够有效改善汽轮机内部的流场分布。以某实施改造的机组为例，该措施使末级动叶根部二次流损失减少 12%，极大地降低了气动损耗，进一步提升了汽轮机的整体性能。

高中压缸分流环的流线型改造同样取得了显著成效。某发电集团运用先进的数值模拟技术，对分流环的弧度进行优化设计，有效减少了气流冲击损失。实践数据表明，单台机组通过此项改造，年标煤消耗降低 5.7 万吨，且改造投资回收期仅 14 个月，在实现节能增效的同时，也为企业带来了良好的经济效益。此外，转子调节级叶顶加装弹性汽封装置，可使机组平均煤耗下降 $1.8\text{g}/\text{kW}\cdot\text{h}$ ，该技术凭借其良好的节能效果与可靠性，已在 12 台 600MW 机组实现规模化应用，为电力行业节能改造提供了成功范例。

2.2 低压缸适应性改造

热电联产机组在深度调峰过程中，常面临低压缸进汽量不足、叶片水蚀等一系列技术难题，这些问题不仅影响机组的安全稳定运行，还制约了其经济效益的提升。国能费县电厂 1 号机（650MW 超临界机组）针对这些问题，采用低压缸零出力改造技术，通过对中低压连通管进行改造，并增设旁路系统，有效解决了小进汽量工况下的安全运行问题。同时，在末级叶片根部采用超音速火焰喷涂耐水蚀涂层，该涂层具备优异的耐磨、耐腐蚀性能，使叶片使用寿命延长至 8 年以上，成功攻克了调峰工况下的设备损耗难题。改造完成后，机组供热能力大幅提升，可达 1900 万平方米，热耗率降低 4.2%，在满足区域供热需求的同时，显著提升了机组的经济性与能源利用效率。

3 冷端系统精细化节能调控实践

3.1 冷端系统边界与设备管理

依据 DL/T2709—2023 标准，冷端系统边界界定为从汽轮机排汽口至循环水回凝汽器的完整回路，该系统如同电力生产的“散热中枢”，其核心设备包括凝汽器、循环水泵、冷却塔（空

冷岛）等。经系统能效分析显示，凝汽器在冷端节能体系中的权重占比高达 40%，成为关键调控对象。对于湿冷机组，冷却塔填料作为热量交换的核心部件，其老化、结垢等问题直接影响换热效率；空冷机组则需重点关注空冷岛风机转速、叶片角度与环境风速、风向的动态适配关系。

长江中游某湿冷电厂创新应用凝汽器真空严密性在线监测系统，通过分布式压力传感器网络 and 智能检漏算法，将传统季度性检漏周期缩短至每周。该系统通过建立真空泄漏率与机组效率的数学模型，精准定位漏点位置，使真空系统泄漏率从 $0.68\text{kPa}/\text{min}$ 大幅降至 $0.26\text{kPa}/\text{min}$ ，排汽压力降低 0.8kPa ，对应机组效率提升 0.4%，年节约标煤约 1800 吨。北方某空冷机组在空冷岛安装风向追踪装置与智能控制系统，通过实时采集环境风速、风向数据，动态调整风机运行参数，使空冷岛换热效率提升 3.5%，循环水温度降低 2.1°C ，有效缓解夏季高温时段机组背压过高问题。

3.2 数据驱动的运行优化

按照标准要求构建的“监测-计算-优化-维护”闭环管理体系，通过对排汽压力、循环水温度/流量、环境温湿度等 30 余项核心参数的实时监测，形成覆盖冷端系统全生命周期的数字画像。某电厂在循环水直管段安装高精度超声波流量计，结合上风侧无遮挡处设置的自动气象站，构建起立体化监测网络，数据采集频率达 1 次/分钟，准确率高达 99.2%。

冷端性能计算采用标准推荐的智能模型：针对凝汽器端差，引入负荷修正因子建立动态补偿模型，消除机组负荷波动对计算结果的影响；循环水耗电率采用基于机器学习的实时计算模型，通过分析历史数据挖掘节能潜力。基于这些模型拟合出的最优运行曲线，电厂实现循环水泵运行台数的智能动态调节。在 50% 负荷工况下，循环水系统耗电率降低 23%，年节电 126 万 kWh，相当于减少二氧化碳排放 1200 吨。

4 机组运行方式动态优化技术

4.1 滑压运行与负荷调控优化

滑压运行通过动态匹配主蒸汽压力与机组负荷，减少阀门节流损失，被视为提升机组变负荷运行效率的核心技术。华东某 600MW 超临界机组应用第三代滑压优化算法，通过采集 10 万组运行数据建立 40%–90% 负荷区间的最优压力曲线。该曲线充分考虑煤质变化、环境温度等因素，使机组热耗率改善达 $187\text{kJ}/\text{kWh}$ ，在年调峰时长 1200 小时的工况下，年节约标煤 3200 吨。

在多机组协同运行方面，某区域能源中心采用基于大数据的负荷精准分配策略。该策略通过建立各机组实时效率模型，结合电网负荷预测数据，动态制定负荷分配方案，使全厂机组平均运行效率提升 1.2%。同时，通过 AGC 指令优化算法，将机组负荷响应速度从 $3\text{Pe}/\text{min}$ 提升至 $5\text{Pe}/\text{min}$ ，在参与电网深度调峰过程中，年获得辅助服务收益超 800 万元。

4.2 运行参数精准控制

主蒸汽温度作为影响机组热效率的关键参数，某电厂引入自适应 PID 控制系统，该系统通过实时辨识机组动态特性，自动调整控制参数，将主汽温波动范围从±8℃收窄至±2℃。经测算，该优化措施每年可节约标准煤 3800 吨。再热蒸汽温度控制采用烟气挡板与喷水量协同调节策略，通过建立温度-挡板开度-喷水量的三维控制模型，实现额定负荷下再热汽温达标率 100%，显著降低了锅炉尾部受热面的传热损失。

沿海某电厂开发的实时热效率诊断系统整合了 12 项关键参数，采用深度学习算法构建机组能效预测模型。该系统每 5 分钟生成运行参数优化建议，通过三年的持续应用，累计增效 2700 万元。在低负荷工况下，系统通过优化燃烧配风、磨煤机组合等参数，使机组最低稳燃负荷从 30%Pe 降至 25%Pe，有效提升了机组深度调峰能力。

5 余热梯级回收与利用技术

5.1 低品位余热回收

低压缸零出力改造为余热回收开辟新路径。某热电联产项目在实施改造后，配套建设低品位热源回收装置，采用吸收式

热泵技术将汽轮机排汽余热用于区域供暖。该系统年新增供热能力 40 万吉焦，替代燃煤锅炉 12 台，减少 CO₂ 排放 3.2 万吨。在余热发电领域，低位热能有机朗肯循环（ORC）技术在多家电厂成功试点。采用 R245fa 工质的 ORC 系统，通过优化蒸发器和冷凝器结构设计，使余热发电效率达 15%，单台机组年发电收益超 800 万元，投资回收期缩短至 3.5 年。

5.2 蒸汽蓄能调峰技术

调峰期间富余蒸汽的回收利用成为节能增效的重要突破口。某科技公司研发的高温蒸汽蓄能装置采用复合相变蓄热材料，可实现 1.0MPa 饱和蒸汽的高效储存。该装置通过智能控制阀门实现“低谷蓄能、高峰释能”，响应时间小于 30 秒，有效提升机组调峰灵活性。某电厂应用该技术后，年节省燃料成本 1500 万元，同时降低了因频繁启停机组造成的设备损耗，延长了机组使用寿命。

6 节能技术实践效果评价

6.1 单项技术节能效益

技术类型	应用机组	关键指标改善	年节能效益
蜂窝式汽封改造	300MW 机组	高压缸效率+2.7%	标煤 2100 吨
低压缸零出力改造	650MW 机组	热耗率-4.2%	增效 1200 万元
冷端优化调控	600MW 湿冷机组	循环水耗电率-23%	节电 126 万 kWh
ORC 余热发电	350MW 机组	余热利用率 15%	发电 680 万 kWh

6.2 综合节能体系成效

某电厂在构建“本体改造+冷端优化+运行调控”综合节能体系后，实现了显著的节能增效目标。通过引入先进的密封材料和优化汽轮机本体结构，有效降低了机组的内部漏汽损失；对冷端系统进行全面诊断与优化，包括凝汽器清洗、循环水泵变频改造等措施，大幅提升了冷端系统的整体性能。

经过改造，机组供电煤耗从 302g/kW·h 降至 289g/kW·h，降幅达 4.3%，年减少标煤消耗 1.3 万吨，折合经济效益超 800 万元。同时，CO₂ 排放降低 3.5 万吨，NO_x、SO₂ 等污染物排放也相应减少，环保效益显著。该体系顺利通过 DL/T2709—2023《火力发电厂汽轮机节能优化技术规范》标准合规性评估，冷端系统能效系数从 0.82 提升至 1.00，达到行业优秀水平，为同类型机组节能改造提供了示范样板。

7 结论

电力行业汽机运行节能技术实践已形成多维度突破。在本体改造方面，通过采用新型蜂窝汽封、可调式汽封等密封优化技术，以及通流部分结构升级，有效降低了汽轮机内耗，提高了蒸汽做功效率；冷端调控依托最新行业标准，对凝汽器、循环水系统等进行系统性优化，实现了冷端系统各设备间的高效协同运行；运行优化则借助智能监测与控制系统，基于实时运行数据进行深度分析，动态调整机组运行参数，使机组始终保持在高效运行区间；余热回收技术的应用进一步拓展了节能空间，通过对汽轮机排汽余热、锅炉烟气余热等的回收利用，提

高了能源综合利用率。

国能费县电厂、华能玉环电厂等典型案例表明，单项节能技术的应用可实现 2%~5%的能效提升，而综合节能技术体系的应用则能使供电煤耗降低 10g/kW·h 以上，节能效果提升显著。

[参考文献]

[1]国家能源局.DL/T2709—2023 汽轮发电机组冷端节能管理导则[S].北京：中国电力出版社，2023.

[2]王建军，李庆，张宏.600MW 超临界汽轮机通流改造节能效果分析[J].节能技术，2024，42（2）：156-161.

[3]刘振宇，陈亮，赵伟.汽轮机低压缸零出力改造实践与性能评估[J].中国电力，2024，57（11）：89-95.

[4]张明，刘晓峰.基于 DL/T2709 标准的冷端系统优化运行研究[J].热力发电，2025，54（3）：78-84.

[5]李红智，王鹏，刘杨.火电机组滑压运行曲线优化及应用[J].动力工程学报，2023，43（8）：645-651.

[6]中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB/T34170-2023 火电机组能效评价方法[S].北京：中国标准出版社，2023.

[7]陈勇，赵斌.有机朗肯循环在汽轮机余热回收中的应用[J].可再生能源，2024，42（5）：612-617.

[8]王小明，李静.汽轮机汽封技术发展及节能应用综述[J].热能动力工程，2023，38（7）：1-8.