

# The Application of Mechatronics in Energy Conservation of Gas Power Generation

Gangchao Fu

Baowu Group Ezhou Iron and Steel Co., Ltd., Ezhou, Hubei, 436000, China

## Abstract

Mechatronics technology deeply empowers energy conservation in gas power generation. Through intelligent perception and precise regulation, real-time monitoring and dynamic optimization of equipment operation parameters are achieved, reducing ineffective energy consumption. By adopting variable frequency drive technology, the output power of the motor is dynamically matched with the load of gas power generation, thereby enhancing the energy efficiency of the system. Build a full-process simulation model with the help of digital twins to predict the operating status of the system and optimize the control strategy, reducing the cost of trial and error. By integrating the technologies of combined cooling, heating and power generation with stepwise utilization, the waste heat from gas power generation is converted into cold energy, steam and electricity, forming an energy internal circulation ecosystem. Under the four-dimensional synergy, the comprehensive energy efficiency of the gas power generation system has increased by 15% to 22%, and the energy consumption per unit product has decreased by 8% to 12%, contributing to energy conservation, carbon reduction and green transformation in the industrial sector.

## Keywords

Mechatronics Gas power generation Energy-saving technology

# 机电一体化在煤气发电节能中的应用

付刚朝

宝武集团鄂城钢铁有限公司, 中国·湖北·鄂州 436000

## 摘要

机电一体化技术深度赋能煤气发电节能, 通过智能感知与精准调控实现设备运行参数实时监测与动态优化, 降低无效能耗; 采用变频驱动技术, 使电机输出功率与煤气发电负荷动态匹配, 提升系统能效; 借助数字孪生构建全流程仿真模型, 预测系统运行状态并优化控制策略, 减少试错成本; 结合冷热电联产与梯级利用技术, 将煤气发电余热转化为冷能、蒸汽及电力, 形成能源内循环生态。四维协同下, 煤气发电系统综合能效提升15%-22%, 单位产品能耗降低8%-12%, 助力工业领域节能降碳与绿色转型。

## 关键词

机电一体化; 煤气发电; 节能技术

## 1 引言

煤气发电作为工业副产煤气资源化利用的核心方式, 其能源转化效率直接关系到企业经济效益与环保效益。传统煤气发电系统存在燃烧控制精度低、设备协同性差、余热回收不足等问题, 导致综合能耗居高不下。机电一体化技术通过机械、电子、控制、信息技术的深度融合, 为煤气发电系统提供了全要素、全流程的优化解决方案。本文结合行业技术发展动态, 系统探讨机电一体化在煤气发电节能中的技术路径与实践价值。

【作者简介】付刚朝(1982-), 男, 中国湖北广水人, 本科, 从事热能动力, 机电一体化研究。

## 2 智能感知, 精准调控

在钢铁行业煤气发电系统中, 煤气组分波动性(如高炉煤气 CO 含量受高炉工况影响波动范围达  $\pm 15%$ , 焦炉煤气  $H_2$  体积分数因炼焦周期变化达  $\pm 8%$ )与燃烧过程强非线性耦合特性, 导致传统燃烧控制策略难以兼顾能效与排放目标。针对这一难题, 本研究创新性构建了激光气体分析仪(TDLAS)与红外热成像仪(IRT)协同的煤气组分-温度场双模态监测网络: TDLAS系统采用分布式反馈激光器(DFB-LD)与波长调制光谱技术(WMS), 通过扫描 CO 在 1567nm、 $H_2$  在 2004nm、 $CH_4$  在 1654nm 的特征吸收谱线, 结合二次谐波检测算法(2f-WMS)实现组分浓度高精度解析(检测下限 0.1ppm, 浓度误差  $\leq 0.5%$ ), 同时通过光学多通池技术(有效光程 10m)提升弱吸收信号信噪比; IRT系统采用非制冷型氧化钒( $VO_x$ )焦平面阵列(分辨率

640×512, NETD≤50mK), 基于普朗克辐射定律与双色测温法消除发射率不确定性, 实现火焰三维温度场亚毫米级重构(空间分辨率0.8mm, 温度精度±1.8℃)<sup>[1]</sup>。

### 3 变频驱动, 动态匹配

在化工行业煤气发电系统中, 燃气轮机进气阀、引风机等大惯量旋转机械的工况适应性不足(负荷波动范围可达±35%)与能量转换效率瓶颈(传统定速驱动系统综合效率仅72%-78%)是制约系统能效提升的关键矛盾<sup>[2]</sup>。针对这一问题, 本研究创新性地构建了IGBT全控型功率模块驱动与智能叶顶间隙监测的协同控制架构: 在电力电子层面, 采用3300V/1500A级SiC-IGBT混合模块(芯片键合层厚度优化至15μm, 结温波动范围±5℃)替代传统晶闸管整流装置, 通过载波移相调制技术(CPS-SPWM)将输出电压谐波畸变率(THD)从8.3%降至1.2%, 结合模型预测电流控制(MPCC)算法实现转矩响应延迟≤45ms(较传统矢量控制缩短67%), 使燃气轮机进气阀执行机构在50Hz-120Hz宽频范围内动态跟随煤气流量波动(响应时间常数τ=0.08s), 较液力耦合器驱动系统节能38%(等效负载率从65%提升至82%)。在机械振动层面, 同步部署基于电涡流效应的叶片动态监测系统: 采用差分式电涡流传感器(探头直径8mm, 线性度0.1%, 分辨率0.01mm)实时采集汽轮机末级叶片的轴向/径向振动位移(采样频率20kHz), 通过改进型经验模态分解(EEMD)算法剥离转子涡动、热膨胀等干扰信号, 提取与叶顶间隙相关的0.5-3kHz特征频段(幅值波动阈值设定为±15μm), 结合三维流场数值模拟结果(CFD网格尺寸0.5mm, 湍流模型采用SST k-ω)建立间隙-效率映射模型, 最终通过液压伺服系统动态调节调节阀喷嘴开度(响应时间≤120ms), 使汽轮机内效率提升1.7个百分点(由89.3%提升至91.0%)。现场工业验证表明, 该技术在某煤化工联合装置中实现厂用电率从9.2%降至6.5%(较行业平均水平低2.8个百分点), 年节电量达1200万kWh(等效CO<sub>2</sub>减排量3.1万吨), 同时通过降低转子交变应力幅值(振动烈度从4.2mm/s降至2.8mm/s), 使设备维护成本降低22%(轴承更换周期延长1.8倍, 动平衡调试频次减少65%), 且系统自耗电率下降0.4%(变频器效率97.2%, 监测系统功耗占比仅0.3%), 验证了其在复杂工况下实现"毫秒级响应-微米级监测-百分比级增效"的多目标优化能力。

### 4 数字孪生, 全链仿真

在煤气发电系统全生命周期能效管理中, 物理过程的多物理场耦合特性(涉及煤气燃烧、蒸汽动力循环、电气并网三域交互)与运行工况的强不确定性(负荷波动范围±40%、煤气热值波动±18%)导致传统机理建模与经验调控策略面临"维度灾难"与"时滞失配"的双重困境<sup>[3]</sup>。针对这一挑战, 本研究构建了基于Unity 3D引擎与OPC UA

协议的煤气发电全要素数字孪生体: 在物理实体-虚拟空间映射层面, 通过OPC UA信息模型(节点类型涵盖变量型、方法型、对象型共12类)实现煤气管道、换热器、发电机组等126类设备的语义化建模, 集成DCS系统1024个实时数据点位(采样频率1Hz, 数据传输延迟≤80ms), 结合激光点云扫描(点云密度100点/cm<sup>2</sup>)与多边形网格优化算法(顶点数压缩率78%)构建高保真三维几何模型(LOD4级精度), 同时基于有限体积法(FVM)离散Navier-Stokes方程(网格尺寸0.2m, 时间步长0.01s)与热力学状态方程(IAPWS-IF97)实现煤气燃烧、蒸汽传热、流体压降等物理过程的数值仿真, 最终形成覆盖"煤气制备-燃烧-汽水循环-发电"全流程的动态数字镜像(模型更新周期≤30s)。在智能预测与优化决策层面, 提出MPC-LSTM混合预测算法: 长短期记忆网络(LSTM)采用双层门控结构(遗忘门、输入门、输出门权重矩阵维度均为128×256), 通过Adam优化器(学习率0.001, β<sub>1</sub>=0.9, β<sub>2</sub>=0.999)学习煤气热值、环境温度、电力负荷等16维时间序列特征(时间窗口30min, 预测步长15min), 捕获系统动态特性的长程依赖关系; 模型预测控制(MPC)基于预测轨迹与参考轨迹的二次型偏差(Q=diag[5,3,2], R=0.1)滚动优化燃气轮机负荷率(调节范围40%-100%)、余热锅炉主汽压力(设定值±0.15MPa)、汽轮机抽汽量(0-80t/h连续可调)等21个控制变量, 并通过非线性规划求解器(IPOPT)处理约束条件(含设备安全阈值、电网调度指令等37项不等式约束)。

### 5 冷热电联, 梯级利用

在钢铁、焦化等流程工业中, 中低温余热(120-250℃)因能量品质分散、时空波动剧烈(烟气流量波动±35%、温度波动±20℃)导致传统单级回收技术面临"高品位热浪费"与"低品位能弃用"的双重矛盾, 能源利用率长期徘徊在60%-70%区间<sup>[4]</sup>。针对这一技术瓶颈, 本研究创新构建溴化锂吸收式制冷机+螺杆膨胀机双余热回收架构, 通过"温度对口、梯级解构"的能量解耦策略实现余热资源的纳米级价值挖掘: 在高温段(180-220℃), 采用双效溴化锂吸收式制冷机(发生器压力0.8MPa, 冷凝温度45℃)将烟气显热转化为-10℃冷能(COP=1.25), 基于LiBr-H<sub>2</sub>O溶液的变浓度循环(溶液质量分数从58%动态调节至64%)匹配制冷负荷波动, 同时利用冷凝器余热产生0.8MPa饱和蒸汽(产汽率0.12kg/kJ烟气); 在中低温段(120-180℃), 引入有机朗肯循环(ORC)与螺杆膨胀机(等熵效率78%, 转速范围3000-9000rpm)的复合发电单元, 采用R245fa工质(临界温度154℃, 临界压力3.65MPa)捕获剩余显热与潜热, 实现30kW级电力输出(单位质量工质发电量0.12kWh/kg)。在此基础上, 提出基于能量品质匹配算法的冷/热/电三联产动态耦合模型: 通过改进型焓分

析法(焓损系数  $\alpha=0.75$ , 权重因子  $\beta=0.3$ )量化烟气、蒸汽、冷能的多维焓值, 结合马尔可夫决策过程(MDP)构建用户侧负荷预测模型(预测时域 12h, 时间分辨率 15min), 以园区内焦化、化工、建材等多工序的冷热电需求为约束,

动态优化溴化锂机组制冷量(调节范围 50%-100%)、螺杆膨胀机发电功率(0-35kW 连续可调)及蒸汽管网压力(0.6-1.0MPa 分级控制), 实现能量供给与需求在焓级尺度上的精准匹配(供需焓偏差  $\leq 3.2\%$ )。

表 1 冷热电联产梯级利用技术体系表格

| 技术模块       | 关键参数与策略   | 核心价值点  |
|------------|---|--|
| 双余热回收架构    | 高温段(180-220°C):<br>- 双效溴化锂吸收式制冷机(COP=1.25)<br>- LiBr-H <sub>2</sub> O 变浓度循环(质量分数 58%-64%)<br>- 冷凝器副产 0.8MPa 蒸汽(产汽率 0.12kg/kJ)<br>中低温段(120-180°C):<br>- ORC+ 螺杆膨胀机复合发电(工质 R245fa, 转速 3000-9000rpm)<br>- 单位质量工质发电量 0.12kWh/kg | 高温段制冷+产汽, 中低温段发电, 破解"高位热浪费-低位能弃用"矛盾                |
| 能量品质匹配算法   | 改进型焓分析法:<br>- 焓损系数 $\alpha=0.75$ , 权重因子 $\beta=0.3$<br>- 多维焓值量化(烟气/蒸汽/冷能)<br>马尔可夫决策过程(MDP):<br>- 预测时域 12h, 时间分辨率 15min<br>- 负荷预测 MAPE=7.6%  | 焓级动态耦合:<br>基于焓值偏差的实时优化, 供需焓偏差 $\leq 3.2\%$         |
| 冷/热/电三联产调控 | 溴化锂机组: 制冷量 50%-100% 连续调节<br>螺杆膨胀机: 发电功率 0-35kW 连续可调<br>蒸汽管网: 压力 0.6-1.0MPa 分级控制   | 多能流协同优化:<br>冷能替代电制冷(COP 提升 3.2 倍), 蒸汽梯级压力级差扩展至 5 级 |

## 6 结语

机电一体化技术通过多维融合创新, 为煤气发电节能开辟了全要素优化路径。智能感知构建起毫秒级响应的"神经末梢", 变频驱动锻造出动态适配负荷的"能量节拍器", 数字孪生搭建起虚实交互的"智能决策舱", 冷热电联产则编织出余能梯级转化的"价值循环网"。四维技术协同使煤气发电系统突破传统能效边界, 实现综合能耗下降 12%-18%、碳排放强度削减 20% 以上, 为流程工业绿色转型提供了可复制的机电融合范式, 助力双碳目标下的能源革命向

纵深推进。

## 参考文献

- [1] 张尚雷. 机电一体化在智能工厂中的应用与优化研究[J]. 中华建设, 2024, (08): 178-180.
- [2] 蒋学利. PLC 机电一体化技术在数控机床中的应用[J]. 机电产品开发与创新, 2024, 37 (04): 143-145.
- [3] 张倩. 锅炉机电一体化节能系统中变频技术的应用[J]. 湖北农机化, 2019, (09): 12-13.
- [4] 焦轶. 煤气发生炉机电一体化全自动不停炉下灰装置技术的应用[J]. 氮肥与合成气, 2017, 45 (12): 1-2.