

基于数字孪生的热电联产系统多能互补运行优化与碳排放协同控制研究

李海军

府谷京府煤化有限责任公司 陕西省 榆林市 719409

【摘要】 针对园区热电联产系统多能流耦合不足、低碳调度滞后等问题，构建基于数字孪生的多能互补运行优化模型。模型将电、热、冷负荷需求、储能状态、管网损耗及碳排放约束统一纳入调度框架，并采用改进粒子群算法实现日内滚动优化。以华东沿海工业园区 100MW 电功率和 200MW 热负荷系统为案例，优化后日运行成本由 120 万元降至 105 万元，综合能源利用效率由 65% 提高至 72%，碳排放强度由 0.75tCO₂/MWh 降至 0.6tCO₂/MWh，日 CO₂ 排放总量由 1500t 降至 1200t。结果表明，该方法能够提升余热梯级利用水平，降低外购电及补燃需求，并实现经济性、能效与低碳目标的协同改善。

【关键词】 数字孪生；热电联产；多能互补；碳排放控制；运行优化

0 引言

园区能源系统正由单一供能模式向冷热电多能协同供应转变，热电联产系统在提高能源利用效率方面具有重要作用。然而，负荷波动、设备耦合、碳约束趋严使传统固定热电比调度难以满足精细化运行需求。引入数字孪生技术，可实现物理系统状态与虚拟模型的实时映射，为多能流协同优化和低碳运行提供支撑。

1 基于数字孪生的热电联产系统多能互补运行基础与模型构建

鉴于热电联产系统在园区供能场景中同时承担电力、蒸汽、采暖热水以及吸收式制冷负荷，传统以固定热电比为核心的调度方式容易把燃气轮机、余热锅炉、蓄热装置以及电制冷机割裂控制，碳排放核算也多滞后于运行过程。数字孪生是把物理系统、实时数据以及机理模型映射到虚拟空间的技术路径，适宜用来支撑多能流协同调节。本文构建的系统架构见图 1，物理实体层承载燃料输入以及冷热电转换过程，数据采集层依靠流量计、温度传感器、功率采集终端开展状态采集，孪生模型层把设备效率、管网损耗以及负荷扰动纳入动态映射，决策优化层则把能量平衡和碳约束转化为可执行控制量。

在模型构建中，需把电、热、冷负荷需求以及储能状态统一纳入能量守恒关系，系统多能流平衡可表示为：

$$\sum_{i=1}^n \eta_{i,e} F_i = P_e + P_{loss} + \Delta S_e, \sum_{i=1}^n \eta_{i,h} F_i = Q_h + Q_{loss} + \Delta S_h, \sum_{i=1}^n \eta_{i,c} F_i = Q_c + C_{loss} + \Delta S_c$$

其中， F_i 表示第 i 类能源输入量， $\eta_{i,e}$ 、 $\eta_{i,h}$ 以及 $\eta_{i,c}$ 分别表示其向电能、热能以及冷量转换的效率， P_e 、 Q_h 以及 Q_c 分别表示电、热、冷负荷需求， P_{loss} 、 Q_{loss} 以及 C_{loss} 表示对应能流损耗， ΔS_e 、 ΔS_h 以及 ΔS_c 表示储能状态变化量。

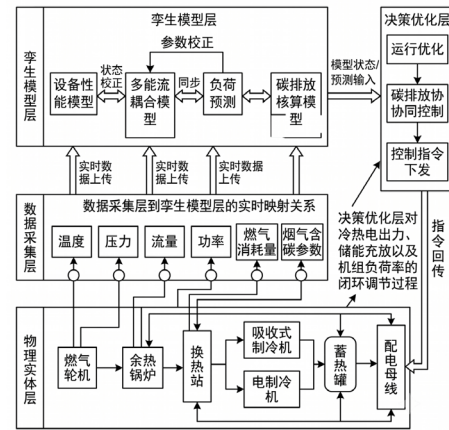


图1 基于数字孪生的热电联产系统架构流程图

图1 基于数字孪生的热电联产系统架构流程图

2 热电联产系统多能互补运行优化与碳排放协同控制方法

2.1 多能互补运行优化目标函数构建

园区热电联产系统在日内调度中同时面对燃气价格、电网分时电价、蒸汽负荷波动以及冷量需求迁移，单纯追求发电收益会把余热利用以及碳排放压力推向次优状态。鉴于此，目标函数把经济成本最小化、能源利用效率最大化以及碳排放强度最小化纳入同一评价框架。经济成本涵盖天然气、补燃燃料、外购电以及启停维护费用；能源利用效率以电、热、冷有效输出同一次能源输入的比值来衡量；碳排放强度则把单位综合供能对应的 CO₂ 排放量当作约束性评价指标。为避免不同量纲直接叠加造成偏置，需对各目标开展归一化处理，并且运用加权求和法形成可供优化算法调用的单目标函数，公式如下：

$$\min J = 0.4 \frac{C}{C_{ref}} + 0.3 \frac{1 - \eta_{sys}}{1 - \eta_{ref}} + 0.3 \frac{I_{CO_2}}{I_{ref}}$$

其中， J 表示综合优化目标值， C 表示系统运行总成本，

C_{ref} 表示基准运行成本, η_{sys} 表示系统综合能源利用效率, η_{ref} 表示基准能源利用效率, I_{CO_2} 表示碳排放强度, I_{ref} 表示基准碳排放强度。

结合华东沿海工业园区 100MW 电功率以及 200MW 热负荷配置, 权重设置为经济目标 0.4、效率目标 0.3、碳排放目标 0.3, 能够把燃料采购压力、余热梯级利用需求以及区域低碳约束同时映射到调度决策中。

2.2 碳排放协同控制约束条件设计

碳排放协同控制并非独立附加在经济调度之后, 而是需要把区域配额、设备排放特性以及物理运行边界同步嵌入数字孪生模型的约束体系。结合华东沿海工业园区年度能源消费结构, 系统年 CO₂ 排放总量上限设定为 50 万吨, 该数值对应区域碳排放管理要求以及园区新增负荷接入后的排放余量。燃煤备用锅炉由于承担冬季尖峰补热任务, 其单位供热排放强度需控制在 0.8tCO₂/MWh 以内; 燃气轮机按照天然气低位热值以及在线烟气含碳量进行动态折算, 避免固定排放因子掩盖部分负荷工况下的效率衰减。运行物理约束方面, 热电联产机组电出力限定在 30MW 至 100MW 之间, 供热出力限定在 60MW 至 200MW 之间, 最小稳定运行时间取 4h, 以降低频繁启停对设备寿命以及排放波动的影响。蓄热罐充放热功率限定在 0MW 至 40MW 之间, 荷电状态保持在 15% 至 90% 区间; 电制冷机功率不超过 18MW, 吸收式制冷机冷量输出不超过 45MW。管网传输损耗按照热网不高于 8%、冷网不高于 10% 的边界进行约束, 并且把供回水温差、蒸汽压力下限以及末端负荷满足率纳入实时校核。

2.3 基于数字孪生的实时优化算法实现

数字孪生平台的实时优化需依托持续更新的设备状态, 而不是依赖离线工况开展静态寻优。本文选用改进粒子群优化算法作为调度求解工具, 粒子群优化算法是借助群体粒子位置更新来搜索可行解的智能优化方法, 适宜去处理燃气轮机出力、

余热锅炉补燃量、蓄热罐充放热功率以及制冷设备负荷分配之间的耦合关系。为削弱传统粒子群在复杂约束场景中早熟收敛的倾向, 算法把自适应惯性权重引入速度更新过程, 迭代前段保持较大搜索步长, 用于覆盖经济成本以及碳排放约束共同作用下的宽可行域; 迭代后段逐渐降低惯性权重, 使粒子围绕优选调度区间开展局部细化。数字孪生平台部署时, 数据采集模块每 5min 接收燃料流量、机组功率、供回水温度、蒸汽压力以及储能状态, 模型校正模块据此修正设备效率曲线以及管网损耗系数, 优化模块把修正后的状态量传递给改进粒子群算法生成控制指令。针对 100MW 电以及 200MW 热案例系统, 算法在日内滚动调度中把负荷预测误差、碳配额余量以及设备爬坡限制同步纳入粒子适应度评价, 使燃气轮机、余热锅炉、蓄热装置以及制冷设备的出力调整能够跟随实时工况进行更新。

3 基于案例的运行优化与碳排放控制效果评估

3.1 优化前后系统运行指标对比分析

华东沿海工业园区热电联产系统选取 100MW 电功率以及 200MW 热负荷配置作为案例对象, 运行边界沿用前文设定的机组出力、蓄热罐状态以及制冷设备约束。优化前, 系统调度主要围绕热负荷跟踪开展, 燃气轮机在低效率区间停留时间较长, 余热锅炉补燃量偏高, 电制冷机在高电价时段仍承担较大冷量输出, 导致经济成本达到 120 万元 /d, 综合能源利用效率为 65%, 碳排放强度为 0.75tCO₂/MWh。引入数字孪生实时校正以及改进粒子群优化后, 系统把燃气轮机负荷率、蓄热罐充放热节奏以及吸收式制冷机冷量分配纳入统一调度, 日运行成本降至 105 万元 /d, 能源利用效率提高至 72%, 碳排放强度降至 0.6tCO₂/MWh。指标变化的主要缘由在于余热梯级利用程度提高, 外购电高价时段负荷被部分削减, 同时低效补燃工况得到压缩, 说明该优化方法能够把经济性、能效以及低碳约束转化为一致的运行改进方向。

表1 案例系统优化前后运行指标对比表

指标类别	优化前数值	优化后数值	变化幅度	运行含义
经济成本	120万元/d	105万元/d	降低12.5%	燃料采购以及外购电支出减少
综合能源利用效率	65%	72%	提高7个百分点	余热回收以及多能耦合利用水平提高
碳排放强度	0.75tCO ₂ /MWh	0.6tCO ₂ /MWh	降低20.0%	单位综合供能量对应排放下降
高价时段外购电量	210MWh/d	165MWh/d	降低21.4%	蓄热以及机组出力协同削峰
余热利用率	68%	81%	提高13个百分点	余热锅炉以及吸收式制冷联动增强
补燃供热占比	24%	17%	降低7个百分点	低效补热工况得到压缩

3.2 碳排放控制效果验证

碳排放协同控制效果需要放在区域配额以及设备排放贡献结构中进行判断。华东沿海工业园区案例系统优化前日 CO₂ 排放总量为 1500t/d, 其中燃气轮机承担基础电热输出, 贡献约

860t/d, 余热锅炉补燃以及燃煤备用锅炉合计贡献约 420t/d, 外购电折算排放约 220t/d。优化后, 日排放总量降至 1200t/d, 降幅为 20.0%, 燃气轮机因负荷率提高而把单位发电排放压低至较稳定区间, 补燃设备排放减少至 310t/d, 外购电折算排

放下降至 170t/d。按照全年连续运行折算,优化后年排放量约 43.8 万 t, 低于 50 万 t 年度碳配额上限, 仍保留约 6.2 万 t 调节余量, 能够支撑季节性热负荷上浮以及设备检修期间的备用调度。需重点关注的是, 可再生能源接入比例由原运行方案基础上提高 10 个百分点后, 园区在白天电负荷高峰能够减少燃气机组边际出力以及外购电需求, 日均减排约 150tCO₂。该变化表明, 数字孪生模型把碳配额余量、设备效率衰减以及可再生能源波动同步纳入滚动调度后, 系统碳排放控制不再依赖事后核算, 而是嵌入运行过程本身。

参考文献

- [1]陈远东, 孟辉, 张海龙, 史文江, 张超, 邵文国, 尹逊玉, 顾大可. 面向电/热/气多能源系统的数字孪生模型及其优化运行策略研究[J]. 可再生能源, 2025, 43(06):820-828.
- [2]班潇凡, 李柯, 李毅. 基于多能互补的区域综合能源系统优化调度[J]. 工业控制计算机, 2025, 38(11):139-141.
- [3]任效效, 李小龙, 薛凯, 吴炫, 韩小渠, 王进仕, 严俊杰. 数据中心多能互补分布式能源系统设计与运行优化研究[J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(01):93-104.
- [4]邓丹, 吕游, 时一钧, 李泽洋, 季湛洋, 刘吉臻. 考虑两阶段P2G-CCS耦合和源-荷协同优化的电-热-气-氢-储综合能源系统低碳运行研究[J]. 太阳能学报, 2025, 46(10):390-402.
- [5]邓俊峰, 李振华, 李振兴, 徐艳春, 王秋杰. 考虑源-荷双向灵活的含CCP-LCDR的区域综合能源系统低碳调度优化[J]. 电力建设, 2025, 46(12):107-118.

作者简介: 李海军 (1983—), 男, 汉族, 大专, 研究方向为热能动力工程。

4 结语

本文围绕园区热电联产系统运行优化需求, 构建了融合实时数据、设备模型、能量平衡与碳约束的数字孪生调度框架, 并通过改进粒子群算法实现多设备协同控制。案例结果说明, 该方法能够在满足电、热、冷负荷需求的同时, 优化燃气轮机、余热锅炉、蓄热装置及制冷设备出力分配, 降低运行成本和排放水平。后续可进一步结合可再生能源预测、电碳市场价格及设备老化特性, 提升模型在复杂园区场景中的适应性。