多装置负荷动态匹配降低煤化工全厂蒸汽管网波动的对策

杨　峰

宁夏和宁化学有限公司 宁夏 灵武 750411

【摘　要】：煤化工多装置并行生产工况切换频繁，蒸汽产耗时空错配易引发全厂蒸汽管网压力、流量大幅波动，威胁机组稳定运行并造成能源损耗。依托全厂蒸汽产耗耦合特性，构建多装置负荷动态匹配调控体系，建立蒸汽源侧、负荷侧联动调节机制，统筹气化、合成、热电等单元负荷协同调整，实时平衡蒸汽供需差值。结合管网阻力特性划分调控区间，配套分级缓冲与预判调节策略，削弱单装置工况扰动在管网内的传导放大。工程应用表明，该调控方式可抑制蒸汽管网压力波动幅度，减少减温减压不可逆能量损失，提升蒸汽系统供配稳定性与全厂热能利用效率，为煤化工大型复杂蒸汽管网的平稳运维提供技术路径。

【关键词】：煤化工；蒸汽管网；负荷动态匹配；管网波动；多装置协同；热能调控

DOI:10.12417/2705-0998.26.14.039

1 煤化工全厂蒸汽管网波动成因及多装置耦合特性分析

1.1 蒸汽产耗扰动源类型与管网波动传递机制

煤化工产业链包含气化、净化、合成、热电等多套生产装置，各单元生产任务独立，蒸汽产出与消耗行为具备异步变化特征。原料性质改变、生产计划调整、设备周期性检修、局部装置临时启停，均可成为蒸汽系统扰动源头。部分装置短时间内蒸汽耗量骤增或产汽量回落，供需失衡信号沿蒸汽管道快速扩散，管网压力随之发生偏移。管网内不同等级蒸汽管线相互连通，单点扰动不会局限于发生单元，会沿管网节点持续传导叠加，形成跨区域压力振荡。管网缓冲设施容量存在上限，扰动持续作用时，压力波动幅度逐步放大，触发安全阀动作、机组调速系统频繁响应等安全隐患。某大型煤制烯烃项目运行期间，合成装置负荷调整引发中压蒸汽管网扰动，波动信号传递至热电锅炉产汽系统，造成锅炉燃烧工况不稳定，间接增加蒸汽系统不可逆能量损耗。管网节点之间的介质传输存在滞后效应，滞后特性进一步放大动态扰动，常规单点调压设备难以抵消跨装置带来的连锁冲击。

1.2 多装置蒸汽产耗耦合关联特征

煤化工各装置蒸汽供需并非独立体系，高、中、低压蒸汽管网通过减温减压装置、蒸汽透平相互关联，构成一体化能量网络。气化装置副产大量中压蒸汽，作为管网主要汽源；合成、净化装置为主要蒸汽负荷，热电锅炉作为备用补充汽源，各单元运行状态相互牵制。一套装置负荷变动，会同步改变不同压力等级蒸汽的抽取与消耗体量，跨等级管网之间形成联动影响。装置固有工艺约束限制蒸汽调节速率，部分反应单元不允许负荷快速升降，造成汽源侧与负荷侧调节能力不匹配。汽源可调裕度与负荷调节窗口存在时间差，当多个装置同步发生工况变动，蒸汽供需缺口叠加，管网运行状态偏离设计稳态区间。某煤制合成氨项目生产运行阶段，气化装置提负荷副产蒸汽增多，而下游合成装置维持低负荷运行，富余蒸汽只能通过减温减压泄放，能量品质降级，管网压力持续偏高，体现多装置耦合下蒸汽供需错配带来的运行难题。不同装置调节响应时间差异，使得蒸汽系统动态平衡难度提升，单纯依靠局部调压手段无法实现全厂层面的供需适配。

1.3 现有蒸汽调控模式局限性

现有煤化工蒸汽系统调控方案多以单台设备、单套装置为调控对象，依托就地压力调节阀完成局部参数稳定，调控范围局限于单一管网节点。调控动作仅针对已经产生的压力偏差进行被动校正，缺少对全厂多装置工况变化的预判能力。各装置调控单元独立运行，缺少跨装置信息互通，单装置调压操作会对邻近管网节点带来次生扰动。减温减压装置作为管网压力兜底手段，依靠节流降温实现参数匹配，会造成蒸汽烟值损失，属于高耗能被动调节方式。调控逻辑未考虑多装置之间产耗耦合关系，当全厂多源多负荷同步波动时，就地调节手段容易出现调控振荡，参数反复震荡。某煤制乙二醇项目原有蒸汽管控模式下，热电锅炉、气化装置各自独立调节，上游产汽波动出现后，下游负荷端调节滞后，管网压力反复振荡，频繁触发系统报警，只能依靠人工现场干预维持基本运行。传统调控缺少全厂统一的协同调度逻辑，无法从源头平衡多装置蒸汽供需矛盾，难以从根本抑制管网大范围波动。

1.4 管网波动对煤化工系统安全与能效的影响

蒸汽管网压力持续偏离设计区间，直接影响蒸汽驱动透平机组稳定工作状态，透平转速波动会牵连压缩机组、泵类等关键动设备运行，增加设备振动、密封失效风险。压力过低时，部分工艺单元蒸汽供热不足，反应温度难以维持，化工产品转化率下降；压力过高则管道、管件承受超出设计载荷，提升管线法兰、阀门泄漏风险。管网频繁波动迫使系统长期启用减温减压支路，高品质蒸汽降级利用，大量可用功损失，全厂热能利用水平下降。持续动态扰动会加速管道疲劳损伤，缩短蒸汽管线、阀门、压力容器使用寿命，提升设备维护频次与运维成本。某煤制烯烃项目曾出现中压蒸汽管网长时间小幅振荡，透

平机组振动指标持续抬升，被迫限制装置负荷，压缩产品产出规模，生产计划被迫调整。

2 多装置负荷动态匹配调控体系构建与管网波动抑制对策

2.1 全厂蒸汽产耗数据感知与工况预判模块搭建

依托全厂 DCS 系统采集各装置蒸汽产汽量、耗汽量、管网压力、温度等实时运行参数，打通气化、热电、合成、净化装置数据链路，消除各单元信息孤岛。建立全厂蒸汽网络数字映射模型，表征不同管网节点介质传输时延、阻力特性与装置产耗边界条件，量化各装置负荷变动对各级蒸汽管网的影响权重。设置工况识别规则，自动识别装置升降负荷、原料切换、设备临修等扰动事件，预判扰动传播路径与供需缺口变化趋势。依据装置工艺约束划定各单元负荷可调区间，明确各装置允许的蒸汽调节速率上限，规避调控操作违反工艺安全限值（见图 1）。

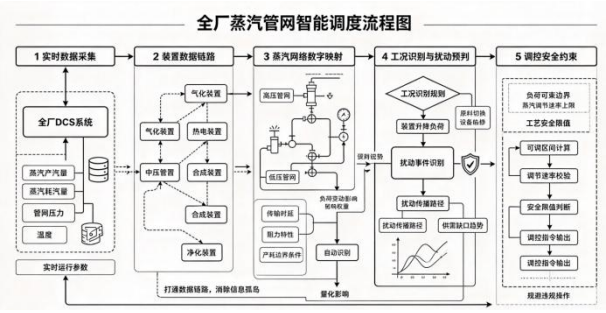

图 1 全厂蒸汽管网智能调度流程图

2.2 多装置源荷协同调控逻辑设计

以全厂蒸汽管网压力稳定作为核心调控目标，统筹汽源侧与负荷侧资源，构建多装置联动的负荷动态匹配逻辑。汽源侧优先调整副产蒸汽装置产汽量，热电锅炉作为兜底调节汽源；负荷侧选取具备快速调荷能力的工艺单元同步改变蒸汽消耗量，双向对冲蒸汽供需差值。建立分级响应机制，根据管网压力偏差等级匹配不同调控策略，小幅偏差优先依靠可调负荷单元微调，大幅扰动启动多装置联合调节。约束各装置负荷调节速率，同步下发调节指令，弱化不同装置响应时差带来的次生波动，避免分步调节造成管网参数反复震荡。

2.3 管网缓冲设施优化与扰动阻断策略

结合蒸汽管网空间布局，优化蓄能缓冲设施布设位置与投切策略，利用缓冲设备吸收短时蒸汽供需冲击，延缓扰动在管网内扩散速度。梳理各级蒸汽管网关键节点，识别扰动传播主干管线，在汽源出口、负荷集中区域设置缓冲单元，缩短扰动响应时间。优化管网阀门组操作逻辑，限制扰动沿跨等级蒸汽管线快速传递，阻断单点扰动向全厂范围扩散。区分短时扰动与持续性工况变化，短时波动依靠缓冲设施平抑，长期供需偏移依靠多装置负荷匹配完成调节，避免缓冲设施长期过载运行。

2.4 调控系统安全联锁与边界保护机制

梳理多装置协同负荷调节过程中的各类风险场景，设置分层安全保护逻辑，当装置达到工艺运行边界时，自动终止负荷调整指令，优先保障化工装置本体安全。设置管网压力上下限硬联锁，参数超出阈值自动切换至就地保护模式，脱离全厂协同调控，防止调控模型异常带来管网失控。建立跨装置通信故障识别机制，当单元数据传输中断，自动暂停对应装置协同调节任务，避免基于失真数据下发错误负荷指令。设置操作权限分级，协同调控策略修改、参数整定需要多级确认，规避人为误操作风险。

3 负荷动态匹配方案的调控效果分析与工程适用性研判

3.1 管网压力动态响应特性对比分析

对比传统就地调节模式与多装置负荷动态匹配方案下，蒸汽管网面对各类工况扰动时的压力动态响应特征。选取装置提降负荷、原料品质变化等典型扰动场景，观测管网压力变化速率、振荡持续时长等指标差异。传统调控模式下，扰动发生后管网压力偏移幅度大，参数振荡衰减周期较长，压力长时间无法回归稳态区间。采用多装置负荷动态匹配方案，扰动出现前可依托预判模块提前启动源荷协同调整，压力变化速率得到抑制，振荡衰减进程加快。某煤制乙二醇项目开展工况扰动对比测试，合成装置快速升降负荷产生蒸汽扰动，采用协同调控方案后，管网压力波动持续时间缩短，参数能够快速回归稳定区间。

3.2 蒸汽系统能量利用状态评估

跟踪不同调控模式下减温减压支路介质流量变化，评估高品质蒸汽降级损耗水平，解析多装置负荷匹配方案对热能利用状态的改善作用。传统调控依靠节流泄压消化富余蒸汽，大量㶲损失持续发生，能量利用效率受限。多装置负荷动态匹配从源头平衡蒸汽供需，减少富余蒸汽与蒸汽缺口规模，降低减温减压装置工作负荷，保留蒸汽能量品质。对全厂蒸汽产耗全流程能量流向进行梳理，对比两种调控模式下副产蒸汽就地消纳水平，评估副产蒸汽资源化利用提升效果。某煤制烯烃项目实施负荷动态匹配方案后，中压蒸汽减温减压支路介质流量下降，副产蒸汽在工艺装置内部直接消纳比例提升，减少高品质能量浪费。

3.3 关键动设备运行稳定性变化研判

观察蒸汽透平、工艺压缩机等核心动设备在两种调控模式下的运行状态，分析管网压力波动对机组振动、运行工况的影响规律。管网压力频繁振荡会造成透平进气参数不稳定，机组运行工况点持续偏移，振动指标上升，增加设备疲劳损耗。多装置负荷动态匹配方案稳定管网进气参数，透平机组工况维持

在设计工作区间，减少调速系统频繁动作，降低动设备交变载荷冲击。

3.4 方案工程落地约束与适配场景划分

梳理多装置负荷动态匹配方案落地过程中的各类工程约束，包含装置工艺可调裕度、现场仪表采集能力、控制系统改造条件等限制条件。部分化工反应装置工艺刚性强，负荷调节窗口狭窄，可参与协同调荷的空间有限，这类场景需要重新划定参与调控的装置清单。老旧厂区现场测点缺失、自动化硬件老旧，数据采集时延偏高，会影响工况预判精度，需要配套仪表升级改造。新建煤化工项目自动化基础完善，装置设计阶段预留负荷调节裕度，更适合全面部署多装置协同调控体系。

4 结语

煤化工全厂蒸汽管网波动源于多装置蒸汽产耗异步耦合，单点被动调节难以抑制扰动跨单元传导。依托多装置负荷动态匹配思路，搭建数据感知预判、源荷协同调度、缓冲阻断与安全保护一体化调控体系，以装置间负荷联动对冲蒸汽供需偏差，削弱管网压力振荡。工程实践证明，该调控方式可改善管网动态响应特性，减少高品质蒸汽降级损耗，稳定透平等关键动设备运行工况，缓解管线与自控系统交变载荷冲击。

多装置负荷匹配效果受工艺刚性、现场仪表基础及装置可调裕度约束，存量厂区实施时需结合现场条件精简调控单元。后续可进一步细化非线性管网时延模型，拓展多工况下的智能调度策略，挖掘多等级蒸汽网络协同调控潜力，持续提升复杂煤化工能量管网动态抗扰能力，支撑煤化工装置长周期安全高效运行。

参考文献：

[1] 雷云飞.大型煤化工装置多炉蒸汽大管网负荷先进控制及协调优化控制研究[J].自动化博览,2025,42(3)82-85.

[2] 马欣宇,徐小明,胡峰,等.包钢蒸汽管网热损失影响因素与节能措施[J].包钢科技,2025,51(1)88-91.

[3] 李国良,张德胜.蒸汽管网质量损失分析与节能运行优化策略研究——以某热电公司为例[J].节能与环保,2025,(1)49-55.