

负荷频繁波动下炼化蒸汽管网稳定输配管理优化研究

邱明刚 田 振

山东裕龙石化有限公司 山东 烟台 265702

摘 要: 炼化企业蒸汽管网作为能量梯级利用与工艺供热的核心载体,其运行稳定性直接关系到生产安全与能效水平。随着装置大型化、工艺柔性化及可再生能源并网冲击,蒸汽负荷呈现高频次、大幅度波动特征,传统稳态设计与经验调度难以适应动态运行需求。本文立足系统动力学视角,系统剖析负荷波动对管网压力、温度及凝结水分布的扰动机制,提出涵盖动态水力热力耦合建模、多源协同负荷分配、压力前馈—反馈复合控制及凝结水智能管理在内的四维优化框架,并探讨数字孪生与预测性调度对管理效能的提升路径。研究旨在为炼化蒸汽管网从被动响应向主动预控转变提供理论支撑与管理参照。

关键词: 蒸汽管网; 负荷波动; 输配稳定性; 动态优化; 多源协同

引言

蒸汽系统是炼化企业公用工程的中枢神经,通常由多级压力等级管网构成,承担工艺加热、动力驱动、伴热保温及物料汽提等多元职能。其运行经济性与可靠性直接影响全厂能耗指标与停工风险。近年来,炼化一体化规模持续扩大,装置间热集成度加深,加之市场导向下生产方案频繁切换,蒸汽需求曲线不再是平缓的日负荷带,而是叠加了周期性、随机性乃至冲击性波动的复杂信号。与此同时,碳减排压力促使企业引入余热发电、光伏辅助等波动性热源,进一步加剧了供给侧的不确定性。在此背景下,传统以稳态工况为设计基准、依赖人工经验调阀的输配管理模式暴露出明显局限:压力大幅超调或欠调、管网点温过低产生水击、疏水阀群失效导致带水运行、多台锅炉/余热锅炉负荷分配失衡等问题频发,不仅增加能耗,更威胁设备寿命与系统安全。因此,亟须从管理优化层面重构输配调控逻辑,将负荷波动从“干扰项”转化为“可控输入”,建立适应频繁扰动的新型管控体系。

1 负荷波动特征及其对管网稳定性的影响机制

1.1 负荷波动的时域与频域特征

炼化蒸汽负荷波动可归纳为三类典型模式:其一,计划性波动,如装置开停工、定期切换换热器、再生操作等,具有可预测性但幅度大;其二,随机性波动,由仪表故障、操作扰动、环境温度变化等引发,幅值较小但频次高;其三,耦合性波动,源于上下游装置负荷联动或电力系统频率波动对透平抽汽的影响。从频域看,周期成分(如日间/夜间差异)与突发高频成分叠加,使

得管网动态响应呈现非线性叠加效应。负荷波动的本质是流量—压力—温度三元耦合关系在时间尺度上的非平衡演化。当供汽量变化率超过管网自身缓冲能力(如管容、金属蓄热)时,压力波以声速传播,而温度波则以对流扩散形式缓慢传递,两者速度差异导致瞬态热力状态偏离准稳态假设,进而引发控制偏差累积。

1.2 压力与温度场的扰动传递路径

压力扰动沿管网以弹性波形式传播,其衰减系数受管径、粗糙度及凝结水积聚程度影响。高频波动易激发管洗涤品振荡,当振荡频率接近调节阀或安全阀固有频率时,可能诱发共振性喘振。温度扰动则源于压力变化引起的饱和温度偏移,以及沿途散热损失与伴热管补偿能力的不匹配^[1]。在频繁升降负荷过程中,金属热疲劳与法兰蠕变松弛加速,局部过冷区若遇高温蒸汽,则产生剧烈冷凝水闪蒸,形成两相流冲击——这是水击事故的主因之一。

1.3 凝结水动态分布对输配阻力的影响

蒸汽携带的凝结水并非简单随流排出,而是在低洼处、堵头及倾斜管段积聚形成“水塞”。负荷突增时,流速急剧升高推动水塞撞击弯头或阀门,产生局部高压;负荷突降时,流速降低导致凝结水回流,侵蚀干管底部。传统疏水阀组按稳态排水量选型,在频繁波动下常出现排量不足或蒸汽泄漏并存的矛盾状态,使得管网的当量粗糙度和流动阻力呈时变特性,严重干扰压力调节阀的线性度。

2 现行输配管理模式的主要短板

2.1 静态设计与动态运行的脱节

现行管网设计多采用峰值负荷叠加安全系数,并按平均负荷进行水力热力校核,未将负荷变化率作为约束条件。这导致调节阀口径偏大、控制特性趋于非线性,在小开度区段灵敏度极低;同时,管道支架与补偿器按固定热位移设计,频繁热循环下易发生疲劳断裂。更为关键的是,调度规程仍以固定时段定负荷调整为主,无法响应分钟内级扰动。

2.2 多源供汽协同性不足

炼化企业通常拥有燃煤锅炉、燃气锅炉、余热锅炉及透平抽汽等多类汽源,其响应速度、爬坡速率和经济性各不相同。当前负荷分配往往按定额比例或人工优先级执行,缺乏对汽源动态特性的统筹考量。当总负荷突增时,慢响应锅炉(如燃煤)尚未升压,快响应余热锅炉已满发,被迫启动减温减压补汽,造成高品质蒸汽的能级贬损;反之,负荷突降时,慢响应锅炉难以快速压负荷,只得放空排汽,资源浪费严重。

2.3 压力调控策略的滞后性与被动性

大多数炼化企业采用单回路 PID(比例-积分-微分)调节主蒸汽母管压力,设定值固定且参数整定保守。面对频繁波动,积分作用易产生超调,微分作用又因测量噪声而受限^[2]。实际运行中,操作员常切入手动模式,凭借经验预估“前馈”量,但缺乏量化依据,导致压力波动范围往往超过设计允许值(如 $\pm 5\%$ 扩展为 $\pm 15\%$)。此外,压力设定值未与下游用户动态需求联动,存在“保压过剩”或“供压不足”交替出现的现象。

2.4 凝结水管理碎片化

凝结水回收系统被视为管网附属,疏水阀巡检周期长、故障检测依赖人工听音,大量缺陷陷组未被及时发现。闪蒸罐、凝结水泵的启停控制多基于液位开关的简单逻辑,在负荷快速变化时,液位波动频繁导致泵组频繁启停,加速设备磨损。蒸汽伴热管线的凝结水排放与主网疏水相互干扰,缺乏统一的水力平衡计算,造成部分管段积水无法及时排出。

3 稳定输配管理优化策略体系

3.1 动态水力热力耦合建模与状态感知增强

优化的基础在于对管网动态行为的准确表征。建议构建集总参数与分布参数混合的瞬态模型,将压力波传播、热损失、凝结水生成及两相流效应纳入统一偏微分方程组,采用特征线法或有限体积法进行数值求解。模型参数(如管壁粗糙度、散热系数、疏水阀等效流通面

积)需通过在线数据驱动修正,形成自适应数字孪生体。在感知层,除常规压力、温度测点外,增设高频动态压力传感器和管壁温度阵列,并利用超声波流量计监测瞬时流速及其波动幅度,为模型提供边界条件。状态感知的优化目标并非单纯增加测点,而是通过可观测性分析确定最优传感器布局,使得关键扰动模态可被有效识别。在此基础上,引入波动特征提取算法(如小波变换)分离负荷变化的趋势项与扰动项,为后续控制提供特征量输入。

3.2 多源协同的负荷动态分配方法

打破“以炉定机、以机定管”的刚性分配模式,建立基于响应时间尺度的分层分配架构:(1)秒级尺度:依靠管网蓄热和减温减压阀快速调节,吸收高频小幅波动,维持母管压力瞬时稳定。(2)分钟级尺度:由响应速度最快的余热锅炉和燃气锅炉承担跟踪调节,利用其负荷变化率上限(如 $3\%/min$)跟随总负荷趋势。(3)小时级尺度:由燃煤锅炉及公用工程电站进行基线负荷调整,其经济性最优但变负荷速率受限,可通过预测未来1~2小时负荷曲线提前安排升/降负荷计划。该分层策略需辅以经济性目标函数,综合考虑燃料成本、外购电成本、减温减压损失及设备寿命损耗,采用多目标滚动优化算法(如模型预测控制)求解每个控制周期的各汽源出力指令^[3]。关键约束包括各锅炉最小稳燃负荷、最大升压速率、透平抽汽与发电耦合关系等。

3.3 压力前馈-反馈复合控制与设定值动态整定

在传统反馈控制基础上,引入基于负荷变化率的前馈补偿:以前一时刻测量的供汽流量与用户用汽流量差值及其导数作为前馈信号,叠加至 PID 输出,提前改变调节阀开度,抵消可测扰动的影响。为提高反馈环节的适应性,采用增益调度策略——根据当前负荷区间和波动幅度自动调整 PID 参数(大波动时加大比例作用、减小积分作用;小波动时加强积分以消除静差)。进一步,压力设定值不应恒定,而应依据下游关键用户的最低允许压力及管网压损分布,动态计算各压力等级的最优设定值。例如,当波动导致某支路流量剧增时,适度提高上游母管设定值以补偿管损,但同时提高疏水阀排量阈值,防止压力过高造成安全阀起跳。设定值动态整定需与前述多源分配协同,避免出现“分配优化但设定值失配”的局面。

3.4 凝结水全流程主动管理

将凝结水系统从“被动排放”提升为“主动平衡”子系统,具体措施包括:(1)变阈值疏水策略:根据负

荷变化速率动态调整疏水阀的开启压力和排放周期,在快速升负荷时提前开启辅助疏水支路,防止水塞形成;在降负荷时延迟关闭,保证积水排尽。(2)凝水缓冲罐液位预测控制:引入负荷前馈信号,预估即将产生的凝水增量,提前调节凝水泵转速或并联泵投切,避免液位大幅波动。(3)管段低点排水优化:采用基于瞬态两相流计算的排水口布置准则,并在易积水段增设电导式液位检测,联动紧急排水阀^[4]。(4)伴热系统与主网解耦:为伴热系统设立独立的低压蒸汽分配站,并配置自力式压力调节阀,使伴热负荷不干扰中高压主网的动态响应。

3.5 数字孪生驱动预测性调度决策

上述优化策略的有效落地,有赖于将静态规程升级为闭环决策系统。建议构建以数字孪生为核心的预测性调度平台,其运作流程为:实时状态数据输入→动态模型在线仿真→未来15~30分钟负荷预测(基于统计学习与计划排产信息)→多目标优化求解→最优操控指令下发→实际反馈修正模型偏差。该平台还具备“异常工况推演”功能,可在安全沙箱内模拟极端波动场景(如主力锅炉跳车),预先生成应急调控预案,显著缩短人工决策时滞。管理层面需配套建立波动响应考核指标,不再单纯考核平均压力偏差,而是引入压力波动率、超调频次、凝结水带水时间占比、调节阀动作次数等动态指标,并相应调整操作权限与培训内容,使操作员从“手动调节者”转变为“策略监督者”。

4 管理优化实施的关键保障

管理优化实施的关键保障在于将技术方案深度嵌入企业现有的管理架构与运行文化,而非简单叠加新系统。具体举措如下:首先,打破锅炉、管网及用能装置间的信息壁垒与责任分割,建立厂级统一调度中心并赋予其波动工况下的动态优化决策权。配备具备热力分析与现场操作能力的复合型人才,明确权责界面:日常稳态下维持原有模式,一旦负荷变化率超出预设阈值,调度中心自动接管多源分配与压力调整,确保响应时效与决策一致。其次,完善波动工况操作规程,基于动态模型计算不同波动幅度和持续时间下的安全边界(如最大压降速率、最小过热度等),取代固定的设备铭牌值,

实行分层分级风险管理。将安全边界嵌入优化算法的硬约束中,从源头防止指令越限;同时设置越限报警与人工确认机制,保留操作员在极端工况下的最终裁决权。再次,建立动态模型定期校准制度。针对管道结垢、保温老化及阀门磨损等渐进性物理演变,设计自动化数据筛选与参数辨识流程,剔除无效采样点,精准更新热损系数、流量特性及疏水阀参数。校准周期应动态调整,波动剧烈期加密至每两周一次,平稳期保持月度节奏。最后,开展动态仿真培训。利用虚拟环境模拟从分钟级负荷爬坡到突发性跳机等各类场景,重点培养操作员对控制系统决策逻辑的理解与信任,减少非必要手动干预。引入涵盖响应时间、调节平稳度及安全边界的量化考核标准,并与岗位资质挂钩,形成持续提升能力的闭环机制。

5 结语

负荷频繁波动已从“偶发事件”演变为炼化蒸汽管网运行的常态化工况,传统基于稳态、经验、被动响应的管理模式亟须根本性革新。本文从波动影响机理出发,指出现行管理在静态设计、多源协同、控制策略和凝结水处理等方面的结构性不足,进而提出动态建模、分层分配、复合控制、主动疏水与预测性调度“五位一体”的优化框架。该框架的核心逻辑是将波动视为可测量、可预测、可调控的系统输入,通过信息增强、决策前移和控制细化为管网赋予动态韧性。需要强调的是,管理优化的成功不仅依赖算法与平台,更依赖组织协同、规程重构与人才转型。未来研究可进一步关注波动工况下管网的剩余寿命估计与维修策略联动,以及电-热-汽综合能源系统的跨品级协同优化,为炼化企业深度脱碳背景下的公用工程升级提供更全面的理论支撑。

参考文献

- [1] 王维,李建伟,张磊. 炼化蒸汽管网动态模拟及波动抑制策略研究进展[J]. 化工进展,2023,42(5):2341-2350.
- [2] 陈志华,刘明,赵亮. 基于模型预测控制的工业蒸汽系统多源协同调度[J]. 控制与决策,2024,39(2):567-574.
- [3] 周国华,孙德刚,郑晓峰. 蒸汽管网凝结水积聚诱因及排放优化技术综述[J]. 石油化工设备,2022,51(3):45-52.
- [4] 刘东升,黄志远,吴建明. 数字孪生技术在炼化能量系统中的应用与挑战[J]. 化工自动化及仪表,2025,52(1):1-9.