

LNG接收站再冷凝器工艺控制

王利成 武东林 董继来 蔺蔚然

青岛液化天然气有限责任公司 山东 青岛 266000

摘要：本文系统分析了再冷凝器的结构组成与工作原理，明确了其在BOG回收、能量利用及压力调节等方面的重要作用。围绕温度、压力、液位和流量四个关键参数，详细阐述了各参数对工艺过程的影响及相应的控制方法。构建了完整的控制系统架构，并介绍了自动化控制策略与人机交互方式。针对运行过程中可能出现的问题，提出了相应的解决措施，为提升再冷凝器运行稳定性提供了技术参考。

关键词：LNG接收站；再冷凝器；工艺控制；关键参数；控制系统

引言：随着天然气需求持续增长，LNG接收站在能源供应体系中的地位日益突出。再冷凝器作为核心设备之一，在BOG处理和能量回收方面发挥着重要作用。其工艺控制水平不仅关系到接收站的运行效率，也直接影响系统的安全性和环保性能。近年来，随着自动化和智能化技术的发展，再冷凝器的控制手段不断优化，但仍面临诸多挑战。本文从工艺原理出发，深入探讨再冷凝器的关键控制参数及其调控方法，为相关工程实践提供理论支持和技术指导。

1 LNG 接收站再冷凝器工艺原理

1.1 再冷凝器结构与组成

再冷凝器作为LNG接收站关键设备，具有特定的结构设计。主体结构采用立式或卧式压力容器形式，由高强度低温钢材制造。壳体部分设计为双层结构，内层承受工艺介质，外层提供绝热保护。管束组件采用特殊排列方式，通常选用铝制或不锈钢材质，确保低温工况下的结构强度。封头部分配置有介质进出口，采用法兰连接保证密封性能。内部构件包括分布器、折流板和支撑结构，优化介质流动路径。气相分布装置确保BOG均匀进入冷凝区域。液相收集器实现冷凝后LNG的有效汇集。安全附件包括压力释放装置和紧急切断阀，保障设备运行安全。仪表接口布置合理，便于安装各类检测元件。整体结构设计充分考虑热应力补偿，防止低温收缩导致的变形损坏。

1.2 再冷凝器工作原理

再冷凝器通过特定工艺过程实现功能目标。LNG从顶部进入设备后，经分布器形成均匀液膜向下流动。BOG由下部进入，在上升过程中与低温LNG接触^[1]。气液两相在管束表面发生直接接触换热，BOG释放潜热被冷凝为液态。热量交换过程遵循传热传质基本原理，温度差和接触面积决定换热效率。冷凝后的液体与进料LNG

混合，经底部出口返回储罐系统。未冷凝的残余气体通过顶部排出进入后续处理环节。工作过程中保持特定压力条件，确保冷凝温度处于合理范围。气液界面位置通过液位控制系统维持稳定。整个工艺实现BOG潜热的有效回收，减少能源浪费。操作参数的精确控制保证冷凝效率最大化。

1.3 再冷凝器在LNG接收站中的作用

再冷凝器在LNG接收站工艺流程中承担重要职能。BOG处理系统的核心设备，实现蒸发气的有效回收利用。通过冷凝过程将气相BOG转化为液态，大幅减少气体排放损失。维持储罐系统压力平衡，防止超压导致的安全风险。回收的冷量重新进入工艺流程，提高系统整体能效。作为压力调节的关键节点，保障上下游设备稳定运行。减少再气化系统的负荷，降低外输能耗。工艺参数的稳定控制为全站自动化运行创造条件。异常工况下的安全处理能力，提升装置运行可靠性。与压缩机系统的协同配合，优化BOG处理流程。设计性能直接影响接收站的经济性和环保指标。运行状态的监控为全站能效管理提供重要数据支持。

2 LNG 接收站再冷凝器工艺控制关键参数

2.1 温度控制

再冷凝器温度控制是工艺运行的核心环节。入口温度直接影响BOG的冷凝效果，出口温度则反映系统热平衡状态。温度过高会导致冷凝不完全，过低则可能引发设备冻损。控制目标是将工作温度维持在-120℃至-140℃的合理区间。温度调节主要通过改变加热介质流量实现，精确控制换热器热负荷。LNG与BOG的流量配比调整也是重要手段，通过改变混合比例来调节系统热力学平衡。温度传感器实时监测关键点温度变化，控制系统根据设定值自动调节相关参数。温度梯度分布也需要重点关注，确保设备各部位温差在允许范围内。

2.2 压力控制

再冷凝器内部压力稳定对工艺安全至关重要。工作压力通常控制在0.4-0.6MPa范围内，压力波动会影响冷凝效率并威胁设备安全^[2]。压力异常主要源于进料波动、温度变化或设备故障。控制系统通过压力变送器实时监测压力变化，采用PID算法调节压力控制阀开度。泄压装置作为安全保障，在压力超过设定阈值时自动启动。压力调节需要考虑上下游工艺的匹配，保持系统压力平衡。压力变化速率也需要控制，避免快速波动对设备造成冲击。多参数协同控制可有效提高压力稳定性。

2.3 液位控制

液位控制关系到再冷凝器的操作稳定性和安全性。液位过高可能导致液体夹带，过低则会造成气相短路。正常操作液位应维持在设备高度的30%-70%之间。液位异常通常由进料量变化或排出不畅引起。控制系统通过雷达液位计或差压变送器实时监测液位变化。调节阀根据控制信号自动调整排出流量，维持液位稳定。液位控制需要考虑介质密度变化的影响，必要时进行温度压力补偿。高低液位联锁保护可防止极端工况发生。液位波动幅度需要控制在允许范围内，保证工艺平稳运行。

2.4 流量控制

LNG和BOG流量匹配是再冷凝器高效运行的关键。流量不稳定会导致工艺参数波动，影响冷凝效果。BOG流量通常控制在设计值的±10%范围内，LNG流量根据热平衡计算确定。控制系统通过质量流量计实时监测介质流量，调节阀根据设定值自动调整开度。流量调节需要考虑压力温度补偿，确保测量准确性。流量变化速率需要控制，避免对系统造成冲击。流量配比需要根据工况变化动态调整，保持最佳冷凝效率。流量控制还需要考虑上下游设备的匹配，保证整个系统的物料平衡。多回路协调控制可提高流量调节品质。

3 LNG 接收站再冷凝器控制系统

3.1 控制系统组成

再冷凝器控制系统由多个关键设备组成完整控制体系。温度传感器采用高精度铂电阻元件，实时监测工艺介质温度变化。压力变送器选用耐低温型产品，准确测量系统压力参数。液位检测装置包括雷达液位计和差压变送器，实现液位的冗余测量。流量测量采用质量流量计，确保介质流量数据准确可靠。控制系统核心采用高性能DCS控制器，配备冗余配置的处理器模块。执行机构包括气动调节阀和电动执行器，响应控制信号进行精调。安全联锁系统配备独立的安全仪表系统，实现关键参数的超限保护。所有现场设备均采用防爆设计，

满足危险区域使用要求。信号传输采用双重化总线网络，提高通信可靠性。

3.2 控制策略与方法

再冷凝器控制采用多种先进控制策略确保工艺稳定。温度控制回路采用PID算法，通过参数自整定功能适应工况变化。压力调节采用串级控制结构，主回路控制总压力，副回路调节阀门开度。液位控制引入前馈补偿，根据进料流量变化提前调整控制输出。流量控制采用比值调节，保持LNG与BOG的合理配比^[3]。关键参数控制设置多级报警，实现异常工况的早期预警。复杂控制回路采用模型预测控制技术，提高系统响应速度。安全联锁系统实现三取二表决逻辑，确保保护动作可靠性。控制系统具备无扰动切换功能，实现自动手动模式的平稳过渡。控制参数设置自适应功能，根据负荷变化自动调整控制参数。

3.3 自动化控制系统运行

再冷凝器自动化控制系统实现全流程智能控制。数据采集模块以毫秒级周期扫描现场仪表信号，确保数据实时性。信号处理单元对原始数据进行滤波和线性化处理，提高测量精度。控制运算模块按预设周期执行控制算法，生成调节指令。执行机构接收控制信号，精确调节阀门开度或设备运行状态。系统实时监控关键参数变化趋势，预测可能发生的异常工况。历史数据存储功能记录工艺参数变化，支持运行分析优化。事件顺序记录功能准确记录系统异常发生时间和过程。控制系统具备远程监控功能，支持移动终端访问。定期自诊断功能检测系统硬件状态，预防设备故障发生。冗余切换功能确保单点故障不影响系统正常运行。

3.4 人机交互界面

再冷凝器控制系统提供完善的人机交互功能。操作站配备高分辨率显示屏，显示工艺流程图和实时参数。监控画面采用分层设计，支持快速导航到各子系统。趋势图显示功能支持多参数对比分析，时间跨度可自由调节。操作面板设置权限分级管理，不同岗位分配相应操作权限。报警管理界面分类显示各类报警信息，支持按优先级筛选。参数设置界面提供工程单位转换功能，方便操作人员使用。操作指导功能提供标准操作规程提示，规范操作步骤。报表生成功能自动生成班报日报，支持自定义格式导出。语音报警功能在重大异常时发出语音提示，提高报警响应速度。触摸屏操作支持手势控制，提升人机交互体验。系统提供多语言界面选择，满足不同人员使用需求。

4 LNG 接收站再冷凝器工艺控制常见问题及解决措施

4.1 温度控制异常

再冷凝器温度控制异常直接影响工艺稳定性。加热系统故障导致介质温度不足是常见原因，需要检查热源供应是否正常，确认加热器工作状态。换热管束结垢或堵塞会造成换热效率下降，定期化学清洗和机械清理可维持换热性能。温度传感器漂移或损坏导致测量失真，需定期校验更换检测元件。控制参数设置不当引起调节品质恶化，应重新整定PID参数或切换控制模式。工艺负荷突变超出设计范围时，需要调整操作工况或进行设备改造。温度梯度异常可能预示局部堵塞或泄漏，需停机检查设备内部状况。建立温度变化趋势监控机制，有助于早期发现异常征兆。完善的操作规程和定期维护计划能有效预防温度控制问题发生。

4.2 压力波动较大

再冷凝器压力波动危害设备安全和工艺稳定。BOG压缩机运行不稳定导致进气流量波动，需要检查压缩机工况和控制系统。压力调节阀响应迟缓或卡涩会造成调节失效，定期维护和更换关键部件十分必要。系统存在泄漏点时压力难以维持，需进行气密性检测和修复。安全阀误动作导致压力骤降，应校验设定值并检查阀门密封性。工艺负荷快速变化超出调节能力时，需要优化操作程序或升级控制设备。上下游设备操作不协调引发压カ扰动，应加强系统协同控制。压力变送器测量漂移会造成控制偏差，定期校验测量仪表至关重要。建立压力波动记录分析制度，有助于识别问题根源和改进控制策略。

4.3 液位控制失灵

液位控制失效会严重影响再冷凝器操作安全。液位传感器测量管路堵塞导致信号失真，需要定期冲洗引压管路。控制器硬件故障或软件异常造成调节失效，应及时切换备用系统并排查原因。调节阀执行机构卡涩或膜片破损导致动作失灵，需解体检查并更换损坏部件。介质密度变化引起测量误差，应设置温度压力补偿功能^[4]。泡沫或涡流导致液位测量波动，可安装稳流装置改善测量条件。高低液位报警失灵可能引发事故，需定期测试联锁保护功能。操作人员误操作导致控制模式错误，应

加强培训和权限管理。建立液位控制性能评估机制，定期检查控制回路响应特性。备用控制方案的准备能最大限度降低失控风险。

4.4 换热效率下降

换热效率降低直接影响再冷凝器处理能力。换热管束外壁结冰或内壁结垢导致热阻增大，需要制定合理的除冰除垢计划。内部构件变形或损坏改变流道特性，应停机检查并修复受损部件。LNG与BOG混合不均匀影响传质传热效果，可优化混合器结构设计。操作参数偏离设计值导致效率下降，需调整至最佳工况范围。不凝气体积聚形成气阻，应完善排气系统和操作程序。测量仪表不准造成调节失当，需定期校验关键检测设备。设备保温层破损增加冷量损失，应及时修复并检测保温性能。建立效率监测评估体系，定期计算换热系数变化趋势。预防性维护制度的严格执行能有效延缓效率衰减。工艺优化和技术改造可从根本上提升换热性能。

结束语

LNG接收站再冷凝器工艺控制是一项复杂的系统工程，涉及多参数协同调节和设备优化运行。通过完善控制策略、优化系统设计和加强维护管理，可显著提升再冷凝器运行性能。未来应进一步研究智能控制算法在再冷凝器中的应用，开发更高效的故障诊断技术，推动LNG接收站向智能化方向发展。持续的技术创新将为保障能源安全、提高运营效益提供有力支撑。

参考文献

- [1]陈伟.液化天然气接收站再冷凝器能耗分析[J].能源研究与管理,2023,45(2):123-130.
- [2]王强.液化天然气接收站再冷凝器优化设计[J].工程热物理学报,2022,33(1):78-85.
- [3]苗嘉旭,李轩宇,门驰,等.LNG接收站内BOG再冷凝工艺的计算与优化[J].化学工业与工程技术,2022(002):043.
- [4]丁乙.LNG接收站BOG处理系统工艺及控制研究[J].炼油技术与工程,2023,53(8):20-23.