

撬装式伴生气深冷液化 AI 能耗优化研究

甫 明

新疆克拉玛依市富城天然气有限责任公司 新疆 克拉玛依 834000

【摘要】：在边际油气田井口伴气回收领域，撬装型深冷液化系统能耗集中、耦合强，其中 MRC 和预处理单元能耗高达 90% 以上，传统调控手段难以适应工况波动。本文针对这一难题，结合撬装设备的特点，对人工智能的能耗优化技术进行系统的研究。通过构建轻质 GRU 模型对制冷剂配比进行动态优化，利用 XGBoost 模型实现设备故障预警，利用低成本边缘计算架构降低投资，设计轻量级集成系统加速部署，可实现多参数协同优化，为撬装型伴生气液化系统的高效节能解决方案提供理论基础和技术支撑。

【关键词】：撬装式伴生气；深冷液化；AI 能耗优化

DOI:10.12417/3083-5526.25.03.002

能源转型背景下，油气资源高效回收是油气行业实现节能减排的重要手段，撬装型深冷液化因适应中小容量需求而得到广泛应用，但存在能耗高、调控滞后等问题。原料气成分波动和设备运行衰减容易造成制冷效率降低，传统的固定参数调节和定期维修模式难以应对动态工况^[1]。本文采用人工智能技术，对油气液化过程中的能耗进行精确优化，在降低液化能耗的同时，可提高设备的可靠性，对于促进油气资源高效利用，践行绿色发展理念具有重要的现实意义。

1 撬装式伴生气深冷液化技术核心工艺与能耗特征

1.1 核心工艺原理与系统构成

撬装伴生气体低温液化技术以模块化设计为核心，适用于边际油气田、井口伴气回收等应用场景，其核心流程围绕混合工质循环展开，利用多组分制冷剂逐级冷凝蒸发实现伴生气体低温液化。该系统主要由三个核心单元组成，包括预处理、液化和储存。预处理单元通过脱硫、脱水和脱烃脱除伴生气中的硫、水和重质烃等杂质（硫含量低于 0.1ppm，水含量达到 -60℃ 露点），防止低温下发生冻堵或设备腐蚀^[2]。液化单元中以液化装置为核心，采用小型压缩机加压至 1.5~4.0MPa，再用 MRC 系统与制冷剂进行换热，逐级降温至低于 -162℃ 完成液化；储存单元为 5000-10000m³ 的小绝热储气罐，可实现 LNG 短期贮存和外运，全流程紧凑灵活，适用于 3 万方/天级中小容量需求。

1.2 能耗分布规律

撬装伴生气体低温液化系统能耗表现出明显的集中和耦合特点，超过 90% 的能耗集中在液化装置和预处理装置上，而储存单元的能耗占比很低，形成了“以核心为主，辅为辅”的分布格局。其中，MRC 液化单元（约占总能耗的 60%-65%）是节能优化的核心目标，其能耗主要来自制冷压缩机（40-45%）和伴生气增压压缩机（20-25%），制冷剂配比精度和换热效率直接影响能耗强度^[3]。预处理单元的能耗占总能耗的 25%-30%，其主要能耗来源是脱硫-脱水系统再生加热和原料气体预压缩。由于采用了高效隔热技术，存储单元只需要很少的能量来维持罐内压力的稳定，其能耗仅为 3%-5%，且不会随着

容量的波动而发生明显的变化。为充分展示不同单元的能耗分布规律，可参考表 1：

表 1 不同单元的能耗分布规律

系统单元	能耗占比 范围	核心能耗设备
MRC 液化单元	60%-65%	制冷剂循环压缩机、伴生气增压压缩机
预处理单元	25%-30%	原料气预压缩机、脱硫脱水再生加热器
储存单元	3%-5%	储罐压力调节泵、绝热维持系统

能耗分布中呈现出强耦合特性，如预处理单元原料气预压波动直接影响液化装置压缩机负荷，引起系统能量同向波动。同时，混合工质比例优化能够减少液化装置压缩机耗电量和传热系统损耗，形成跨单元节能效果，也为智能体多参量协同优化提供技术切入点。

2 撬装式伴生气深冷液化 AI 能耗的关键影响因素

原料气特征是能耗波动的根本诱因，其甲烷和重烃组分组成决定了液化热力学难度，提高重烃组分比例会导致冷凝负荷增加，制冷能耗增加，初始压力和温度变化对压缩过程能耗有重要影响，低压力下需要增加功率，升温增加冷却负荷，需要 AI 模型实时捕捉参数波动并进行动态调整^[4]。工艺运行参数是能耗优化的核心，混合工质配比精度直接关系到传热效率，比例失调易造成过冷浪费或液化不充分；压缩机转速与级间冷温协同匹配、换热温差控制精度等均通过热力循环效率影响能耗，多参量、强耦合特征要求 AI 协同优化。设备的运行状态是能耗的基准，其中换热器结垢、压缩机密封失效等会导致热力学平衡被打破，环境温度和湿度又会影响冷凝散热，产能负荷频繁波动需要调节响应速度快，传统调控滞后容易导致能量损耗，AI 实时调控可以有效避免这一问题。

3 AI 在撬装式伴生气深冷液化能耗优化中的应用措施

3.1 构建轻量化 GRU 模型实现制冷剂配比动态优化

作为循环神经网络优化形态的 GRU(gate circuit unit, GRU)，

通过重置栅极筛选历史信息和保留门控信息权重，实现伴生气低温液化过程时序参数的动态关联。考虑到井底伴生气成分和进气流量对气藏波动的影响，该模型能够将分离和脱水单元前馈数据进行集成，突破传统制冷剂配比固定的限制^[5]。通过神经元修剪和权重量化等方法，在保证模型精度的同时，减少计算量，使之与撬装设备的紧凑计算环境完美匹配，实现制冷系统与原料气运行状态实时匹配，实现核心工艺环节的节能降耗。

在具体实施中，可采集三年来低温液化系统运行数据，经拉依达准则剔除异常值，用 Z-Score 法对其进行归一化处理，得到时间步长为 5s 的时序数据集。同时，在 TensorFlowLite 框架下构建 GRU 模型，采用 12 维特征向量作为输入层，隐藏层采用 L2 正则化方法抑制过拟合，采用通道剪枝技术剔除冗余神经元，并对权值进行 8 个比特的量化，最终压缩到 30MB 以内。此外，还可将模型推理模块嵌入到撬装装置 PLC 控制系统中，利用工业以太网对进气成分分析仪、温压传感器和流量传感器进行实时采集，以每 8s 一次的方式输出最佳制冷剂配比命令，驱动制冷剂泵进行变频调速；同时，以脱烃机出口参数为反馈，当预测液化速率偏离实际值超过 3% 时，启动模型增量训练，保证气藏工况变化时保持最佳制冷效率。

3.2 部署 XGBoost 故障预警模型实现关键设备按需维护

XGBoost 模型以梯度提升决策树算法为基础，融合多种弱分类器，构建强学习模型，具有很强的特征挖掘能力和抗噪能力，能够有效地捕捉关键设备运行参数的微小变化与故障模式之间的内在联系。伴气初处理-深冷系统中，分离装置压缩机、脱水装置分子筛吸附装置、深冷装置膨胀机等设备的稳定运行直接关系到能源消耗，而传统的定期检修容易造成过检修或漏检。通过对设备振动、温度等参数的实时监测，对轴承磨损、密封失效、吸收剂老化等问题进行预警，实现按需维修。

在具体实施中，可通过对核心装备的历史故障日志进行梳理，对故障前 1 小时内压缩机振动加速度（水平和竖直方向）、轴承温度、排气压力和温度、电机电流等运行参数进行标注，并对其进行在线监测，并对其进行分类。在此基础上，采用网格搜索的方法对模型的超参数进行优化，确定学习率 0.05，树深度 6，迭代 100 次，利用 5 重交叉验证提高模型的泛化能力，使故障前兆识别准确率大于 96%。同时，在设备控制柜上配置边缘计算模块，将振动传感器、红外测温仪、露点测量仪等设备数据接入 RS485 接口，利用 10s 滑动窗口分别提取时间域（均值、峰值）和频域（频率、频谱能量）特征，当预测设备是否处于亚健康状态（概率大于 75%）时，向运维平台推送预警信息和维修建议（如压缩机轴承润滑、分子筛再生等）。在故障前兆概率大于 90% 的情况下，自动启动备用负荷操作指令，并与管网外输调度系统相关联，并将设备维修记录和运行数据结合起来，定期更新故障特征库，调整模型，保证预警的准确性。

和设备运行的稳定性。

3.3 采用低成本数据采集与边缘计算架构降低系统投资

采用低成本数据采集与边缘计算架构基于工业物联网技术，可对撬装设备已有的传感器接口进行复用，并利用无线通讯技术，大大降低专用数据采集设备的投入和布线成本，使之适应井口分散布局的场景特征。边缘计算通过将数据处理任务下沉到设备端，进行数据收集、特征提取和模型推理等局部化处理，既可减少云数据传输的带宽需求和时延，也可避免大规模服务器集群的构建和维护开销^[6]。这种“边缘处理+云监控”模式，在保证分离、脱水、低温等单元参数实时处理的前提下，可大幅降低 AI 能耗优化系统前期投入，提高技术落地的可行性。

在具体实施中，可选择工业级物联网网关，支持 Modbus-RTU,LoRaWAN 等多种协议，并将设备原有的接口与分离单元压力变送器、脱水单元露点测试仪、深冷单元温度传感器和设备运行状态信息进行连接，对没有标准接口的旧设备，增加低成本窄带物联网无线传感器，并根据参数重要程度设定采样频率（1Hz，设备状态 5Hz，环境参数 10Hz）。边缘计算节点部署在 K3s 轻量级容器编排平台上，基于开源 TensorFlowLite 框架运行 AI 模型，采用工业级嵌入式主板（4 核 ARM 处理器，2GB 内存）替代传统工业服务器。同时，采用分层数据传输方式，边缘节点只向云监控平台发送设备健康状况、预警信息、每日能耗统计和关键过程曲线等数据，并由边缘节点直接向执行机构输出实时控制命令。在硬件选择上，优先考虑国产性价比高的产品，采用批量采购的方式降低单台成本，采用模块化安装的方式设计网关和传感器，缩短现场建设时间，整体数据采集和计算模块的投资比传统方案减少 50% 以上。

3.4 设计轻量集成系统并依托开源框架实现快速部署

基于模块化和标准化的设计思想，可封装数据采集，AI 模型管理，设备控制，可视化监测等功能模块，以标准化的接口进行通信，适应撬装设备的紧凑安装空间和多样化的工艺要求。以开源框架为基础，通过开源框架的开发，大幅降低商业软件著作权的使用成本，同时借助开源社区对软件进行迭代和支持，缩短软件开发周期。针对伴生气初级处理和深冷处理的特殊性，对模块功能和接口协议进行优化，实现不同加工规模和工艺配置条件下系统的快速部署和柔性适配，提高技术推广效率。

在具体实施中，可以 SpringCloudAlibaba 微服务体系结构为基础，将系统拆分为 4 个核心模块，分别封装成独立的 Docker 容器：数据收集服务通过开放的 MQTT 协议实现与物联网网关的双向通信，支持多源数据访问和格式转换。以 MLflow 开源框架为基础，可实现人工智能模型的版本控制、任务调度和推

理服务的部署；设备控制服务采用 OPCUA 工业协议对撬装设备 PLC 系统进行对接，以保证控制命令的实时和可靠；利用 Grafana 开放源码开发工具，可视化监测服务，建立可视化的能源消耗趋势、设备状态和工艺参数曲线。此外，还可建立标准化设备适配接口库，覆盖主流品牌压缩机、膨胀机和分子筛吸附装置的通讯协议和控制逻辑，通过修改工艺参数阈值、设备地址和通讯端口等实现适配。使用 Ansible 自动化维护工具来编写部署脚本，通过对网关参数进行配置，对容器进行镜像拉取，对模型进行装载，对接口进行调试。在此基础上，开发离线部署包，包括所有依赖组件和预训练模型，以满足偏远井下无网络环境下的部署要求，减轻现场技术人员的作业难度。

4 结语

综上所述，撬装式伴生气深冷液化 AI 能耗优化，可从核心过程调控、设备运行和结构设计等多个维度解决撬装液化系统能耗问题，有效提高制冷剂利用率和设备运行稳定性，减少系统投资和运行费用，为伴气回收提供技术支持。未来还可以进一步将数字孪生技术与虚拟现实相结合，建立一个优化平台，实现虚拟与现实的融合；在此基础上，拓展人工智能模型对多工况工况的适应性，并与新能源的耦合应用相结合，实现撬装系统的低能耗智能化升级，促进油气工业的低碳转型。

参考文献：

- [1] 杨进荣,张跃,魏立达,等.小型撬装式液化天然气工艺在页岩气井口气回收的应用[J].化工管理,2021(10):171-175.
- [2] 王继政.模块化整体撬装式制氮装置的设计与应用研究[J].机械管理开发,2025,40(7):160-162.
- [3] 刘诗学,李牧,刘剑楠,等.圆筒形 FPSO 波浪仪自动升降装置撬装化设计研究[J].船舶工程,2024,53(5):57-61.
- [4] 陈兴明,何志山.模块化撬装化 CO₂回收技术研究与应用[J].油气藏评价与开发,2024,14(1):64-69.
- [5] 俞卓玮,周欣海,周军帅.12000Nm³/h 液氮空分装置撬装化设计[J].低温与特气,2022,40(5):37-39.
- [6] 黄博.小型撬装天然气处理技术的工艺优化研究及应用[J].化工管理,2020(19):188-190.