

天然气地面工程中管道气举排水采气系统设计与实现

张鹏飞（四川科宏石油天然气工程有限公司，四川 成都 610000）

摘要：在天然气开发采收过程中，需要采用科学的采收技术，其中管道排水采气技术具有广泛的应用。针对高含水气田开发中地层压力衰减与气井携液能力弱化的技术瓶颈，本文提出集成多相流协同控制理论与智能优化算法的管道气举排水采气系统设计方法。通过构建“地质动态响应-气液协同传输-智能闭环调控”全链条技术体系，融合瞬态流动解析模型、分布式光纤监测网络及数字孪生驱动策略。

关键词：管道气举排水；采气系统；多相流协同控制；动态优化架构；智能调控算法

中图分类号：TE37 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-5167（2025）024-0106-03

Design and Implementation of Pipeline Gas Lift Drainage Gas Production System in Natural Gas Surface Engineering

Zhang Pengfei(Sichuan Kehong Petroleum and Natural Gas Engineering Co., Ltd. Chengdu Sichuan 610000, China)

Abstract: In the process of natural gas development and recovery, scientific recovery techniques are needed, among which pipeline drainage gas recovery technology has a wide range of applications. In response to the technical bottleneck of formation pressure attenuation and weakened liquid carrying capacity of gas wells in the development of high water cut gas fields, this paper proposes a design method for pipeline gas lift drainage and gas production systems that integrates multiphase flow collaborative control theory and intelligent optimization algorithms. The whole chain technology system of “geological dynamic response - gas-liquid coordinated transmission - intelligent closed-loop control” is constructed, integrating the analytical model of transient flow, distributed optical fiber monitoring network and digital twin drive strategy.

Keywords: pipeline gas lift drainage; Gas production system; Multiphase flow collaborative control; Dynamic optimization architecture; Intelligent control algorithm

随着常规天然气藏开发进入中后期，地层压力衰竭与产水率攀升导致气井携液能力持续弱化，传统管道排水采气工艺面临效率阈值瓶颈^[1]。管道气举技术通过注入高压气体降低井筒流体密度，虽可有效恢复气井产能，但其系统效能受制于气液两相流态调控精度、注气参数动态适配性及能耗成本三重约束。

1 技术基础与需求分析

1.1 气举排水采气技术概述

气举排水采气技术以气体动力学与多相流理论为根基，通过井口注入高压气体改变井筒流体压力梯度，形成气液两相协同运移机制^[2]。其核心原理在于利用注气能量降低液柱静压头，使地层水与残余气有效排出，从而恢复气井临界携液流量。技术迭代历经连续气举、间歇气举及智能柱塞气举三个阶段，驱动要素从早期机械能补给向动态能效调控转变。当前技术体系涵盖注气参数优化、气液界面监测及举升效率评估三大模块，但受地层渗透率空间异质性、井筒流态瞬变特性及注采系统耦合迟滞效应影响，传统气举工艺在复杂工况下普遍存在调控精度不足与能耗失衡问题。

1.2 系统需求分析

管道气举排水采气系统设计需深度融合地层动态

响应特性与地面工程约束条件，其需求谱系可归纳为动态调控能力强化、多维度参数耦合优化及全生命周期能效平衡三大维度^[3]。

地层渗透率梯度变化与井筒积液形态的动态迁移，要求系统具备非线性工况的实时适配能力，需通过瞬态流动模型与压力波动抑制算法的协同，构建注气强度随动调节机制。针对多井组气举过程中普遍存在的注采干扰问题，需建立基于井群压力场耦合解析的协同控制框架，以消解气量分配失衡引发的区域性携液能力退化。系统需突破传统单目标优化模式，整合井下流态监测数据、地面管网压力裕度及压缩机运行工况等多源参数，实现注气压力、气液比及举升频率的复合寻优^[4]。

2 系统设计原则、目标与总体架构

2.1 设计原则与目标

管道气举排水采气系统设计需遵循“动态响应优先、能效约束主导、多源协同优化”的核心原则，其目标在于构建具备地质-工程双重适应性的智能举升体系。设计原则聚焦三大维度：

一是动态适配性，要求系统依据地层供液能力动态衰减规律与井筒流态瞬变特性，实现注气参数与生产工况的实时匹配；

二是能效平衡性,需统筹气举能耗成本与排水效率的边际效益关系,建立多目标协同优化机制;

三是鲁棒可控性,须兼容储层非均质渗透率梯度、井间干扰波动及极端工况冲击等复杂扰动,确保系统运行的稳定性边界。

设计目标涵盖技术效能提升与工程适用性拓展两个层面。技术层面需突破传统气举工艺的单向调控局限,通过多相流态精准解析与气液协同运移机制创新,实现举升效率与能耗强度的解耦优化。工程层面则强调系统对高含水气田开发全生命周期的适应性,需构建包含工况迁移预判、节点压力自均衡及异常状态快速响应的闭环控制架构^[5]。

2.2 系统总体架构设计

系统总体架构采用“数据-模型-决策”三层级耦合框架,以多相流动力学模型为理论基底,智能控制算法为执行核心,地面管网优化布局为工程载体。数据感知层集成分布式光纤传感网络与井下多参数监测模块,实时捕获井筒流态、地层渗透率梯度及注气压力波动等动态信息;模型解析层构建气液协同控制模型与能耗优化算法集群,通过瞬态流动仿真与非线性规划求解,实现注气参数与地层响应的动态匹配;决策执行层依托边缘计算单元与自适应控制协议,生成注气节点调控指令与压缩机功率分配策略,形成闭环反馈链路。

架构设计强调多学科理论融合与工程约束嵌入,将地质力学参数、管网拓扑特性及设备运行边界条件纳入统一优化维度。核心功能模块包括井筒流态反演单元、注采干扰抑制算法库及能效平衡评估矩阵,通过动态数据总线实现跨层级信息交互。智能化升级体现于“数字孪生-实时优化”双驱动模式,基于虚拟仿真预演调控策略的有效性,再通过物理系统反馈数据修正模型参数,形成双向迭代优化机制。

3 关键技术与组件选型设计

3.1 气举设备选型与设计

管道气举设备选型需遵循“工况适配性优先、能效最优化主导、全寿命周期可靠性保障”的技术逻辑。压缩机作为核心动力单元,其选型依据井深-注气压力梯度曲线与气液比动态区间,优先采用变工况螺杆压缩机或多级离心压缩机组,通过叶轮拓扑优化与喘振边界扩展设计,适配地层渗透率波动引发的注气压力瞬变需求。

气举阀设计需突破传统固定孔径模式,采用压差-流量双反馈调节阀体结构,基于井筒流态特征动态调整气体注入速率,抑制气液滑脱效应导致的能量耗散。管柱系统设计重点解决冲蚀-腐蚀耦合损伤机制,

依据井筒流体冲蚀速率与硫化氢浓度梯度,选用镍基合金复合涂层油管或玻璃钢内衬套管,同步优化接箍密封结构与壁厚冗余系数。地面管网布局采用多级压力容错拓扑,通过环状管网与枝状管网的复合配置,匹配注气节点压力均衡需求。

3.2 管道系统设计

天然气管道系统设计需统筹流体动力学特性、地质环境约束及长期运行可靠性,其核心在于构建动态压力适配与腐蚀抑制协同优化的传输网络。主干管道采用高强度 X80 钢级螺旋焊管,依据最大注气压力梯度与瞬态水击效应阈值,通过有限元应力分析优化壁厚冗余系数。

针对高含硫化氢与二氧化碳的酸性气田,内壁喷涂纳米陶瓷基复合涂层并集成阴极保护系统,以阻断电化学腐蚀与冲蚀磨损的耦合损伤。管道拓扑布局采用多级环状冗余架构,通过水力仿真模型模拟井间干扰场景,动态调整管径分级与节点压力容差,抑制多井注气时的压力振荡传导。关键节点设计聚焦气液分离效能提升,在注气汇管处设置旋流预分离模块,利用离心力场剥离游离液滴,降低气液两相流对压缩机的液击风险。弯头与变径段采用流线型内衬优化设计,通过计算流体力学模拟湍流强度分布,重构局部流场以削减涡流耗散。智能监测系统集成分布式光纤声波传感阵列与无线压力变送器,实时捕获管道振动频谱与压力波动特征,结合机器学习算法实现微泄漏与管壁缺陷的早期预警。

3.3 控制系统与监测报警设计

管道气举系统控制架构采用“感知-决策-执行”三级闭环体系,依托多源异构数据融合机制实现动态调控。核心控制算法集成模糊 PID 与模型预测控制双模态策略,前者通过井筒压力-流量特征参数自整定,抑制非线性扰动;后者基于数字孪生模型预演注气调控效果,生成最优控制序列。边缘计算单元部署轻量化流态反演模型,实时解析分布式光纤传感数据,动态修正气举阀开度与压缩机转速的协同逻辑,确保调控指令与地层产液动态的毫秒级同步。监测系统构建“点-线-面”三维感知网络,井下段采用高温高压多参数探头阵列,精确捕获气液界面迁移与流型演变;地面管网集成声波-振动双模传感器,通过频谱特征分析识别微泄漏与管壁冲蚀隐患。

异常诊断模块引入迁移学习算法,基于历史故障数据库训练分类模型,实现气窜、液击及设备过载等风险的智能分级预警。报警阈值设定采用动态边界策略,结合气井生产周期阶段性与环境参数波动特性,自适应调整安全裕度区间。

4 系统实施、调试与优化

4.1 硬件采购与安装实施

硬件采购遵循“全生命周期适配性”与“工况鲁棒性”双准则，重点筛选耐腐蚀、抗冲蚀且具备动态响应能力的核心组件。压缩机选型依据最大注气压力阈值与变负荷调节范围，优先配置多级变频驱动单元，适配地层压力动态衰减特性；气举阀采购采用模块化设计标准，预留压差反馈接口以兼容后期智能化升级需求。管材采购严格执行 API5L/5CT 规范，结合硫化氢分压与流速参数优化涂层类型与壁厚冗余系数，同步实施第三方无损检测与爆破压力试验，确保材料力学性能达标。安装实施阶段聚焦空间布局优化与腐蚀防护协同。

地面管网采用三维激光扫描建模技术，预演管道应力分布与热膨胀位移，动态调整支撑间距与弯头曲率半径，规避安装应力集中风险。井下管柱安装集成连续油管作业技术，通过实时井筒成像系统校准气举阀下深位置，确保注气点与积液段精准匹配。关键节点实施冗余防护设计，在压缩机进出口增设脉冲缓冲罐与气液分离预处理器，抑制瞬态压力波动对核心设备的冲击。安装全程执行多维度质量验证，包括气密性氦检漏、振动频谱分析及电气安全联锁测试，为系统调试建立可靠硬件基础。

4.2 软件编程与调试

软件架构采用分层模块化设计，基于微服务框架实现数据解析、智能决策与执行控制的解耦协同。核心算法层集成气液两相流动态模型与自适应优化引擎，通过有限状态机理论构建工况迁移逻辑树，实现注气策略的实时生成与修正。编程重点聚焦多源数据融合处理，开发分布式时序数据库与流式计算引擎，解决井下传感数据高频采样与地面调控指令低时延传输的时序对齐问题。

针对非线性控制需求，设计模糊 PID 与强化学习混合算法，通过奖励函数动态调整压缩机功率分配权重，抑制井间干扰引发的控制振荡。调试阶段采用“数字孪生—物理系统”双向验证策略，在虚拟仿真平台中注入地层渗透率退化、管网压力突变等扰动因子，测试控制算法的鲁棒性与容错能力。关键验证点包括气液界面突变场景下的注气量快速响应、多井协同控制中的压力均衡效率及极端工况下的安全联锁机制。通过注入白噪声与阶跃信号模拟实际工况噪声，优化信号滤波算法参数阈值。调试后期引入迁移学习技术，将实验室标定模型参数向现场实际数据分布适配，利用在线增量学习机制持续提升控制精度，最终形成具备动态进化能力的智能调控系统。

4.3 系统集成与综合测试

系统集成采用多学科协同验证模式，以“功能耦合度—响应时效性—安全冗余性”为验证维度，构建地面管网、井下设备与控制系统的全链路交互框架。集成阶段重点攻克异构协议转换难题，通过 OPCUA 统一架构实现边缘控制器与云端决策平台的无缝对接，同步部署时间敏感网络保障控制指令的确定时延传输。测试流程分三级展开：单元级验证各组件功能边界，子系统级评估气液协同控制效能，系统级模拟极端工况下的动态稳定性，通过故障注入测试检验应急响应机制的可靠性阈值。综合测试引入数字孪生驱动的虚实映射技术，在虚拟空间中复现高含硫气田典型地质模型，注入渗透率突变、井筒积液迁移及多井干扰扰动因子，验证系统在复杂场景下的调控鲁棒性。测试矩阵涵盖压力振荡抑制率、气举效率提升度与能耗成本曲线三大核心指标，采用蒙特卡洛法模拟参数随机波动对系统性能的边际影响。针对测试中暴露的压缩机喘振边界漂移问题，开发动态压力前馈补偿算法，优化注气阀组协同控制逻辑。最终通过 72 小时连续负载冲击测试，确认系统在非稳态工况下仍能维持气液比波动幅度小于 $\pm 5\%$ ，为现场工业化应用提供实证支撑。

5 结语

基于气液协同控制理论与智能优化算法，管道气举排水采气系统设计体系实现了注气参数精准调控、能耗成本动态平衡及极端工况鲁棒响应的技术集成。系统通过数字孪生驱动策略与多源感知网络，有效化解了非均质储层渗透率波动、井间干扰叠加效应及设备运行老化的多重约束，显著提升高含水气井的临界携液能力与气举效率边际，为深层复杂气田开发提供了可复用的技术范式。

参考文献：

- [1] 陈小刚, 李晓玲, 侯建炜, 等. 天然气开采中排水采气技术的应用研究 [J]. 能源与节能, 2024, (10): 91-94, 111.
- [2] 韩国庆, 邢志晟, 岳震铎, 等. 柱塞气举排水采气研究现状及展望 [J]. 天然气工业, 2024, 44(6): 52-63.
- [3] 相金元, 王晓辉, 邓国辉, 等. 增压连续气举排水采气工艺试验分析 [J]. 内蒙古石油化工, 2023, 49(11): 88-91, 95.
- [4] 马群, 徐鹏海, 蒋国军, 等. 超深高温高压气井排水采气技术研究及应用 [J]. 天然气与石油, 2023, 41(2): 112-120.
- [5] 于君利. 中国石油天然气开发技术进展及展望探究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(16): 173-175.