

油田集输系统中多相混输管道稳定性分析与优化设计

李发文 王 青 于龙风 李世艳 季文凤（中国石化胜利油田分公司河口采油厂，山东 东营 257000）

摘要：基于经济性和施工方面的优势，多相混输技术在采油、输油等方面广为采用，但在其实际应用中却伴随着诸如流型转换、压力波动及内壁结垢等稳定性问题，极大程度危害了管道系统的稳定和安全运行。本文基于实验证实了导致多相混输管道不稳定的相关因素，并有针对性地提出相应解决方案（如改变适宜的管道通径、控制一定的管道仰角、构建智能管理系统、借助多相流数学模型及适时清管等措施）来确保系统长时间稳定且高效地运行，这对提高开采及输送系统的可靠性和经济效益，实现智慧能源发展具有非常大的意义。

关键词：油田集输系统；多相混输；管道稳定性；流型控制；优化设计

中图分类号：TE832 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-5167(2025)029-0091-03

Stability analysis and optimization design of multiphase mixed pipeline in oil field gathering and transportation system

Li Wenfa, Ji Wenfeng, Li Shiyuan, Wang Qing and Yu Longfeng(Hekou Oil Production Plant, Shengli Oilfield Branch, Sinopec, Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: Based on its advantages in economy and construction, multiphase co-flow technology is widely adopted in oil extraction and transportation. However, practical applications are accompanied by stability issues such as flow pattern transitions, pressure fluctuations, and internal wall scaling, which significantly jeopardize the stability and safe operation of pipeline systems. This paper verifies the factors leading to instability in multiphase co-flow pipelines through experiments and proposes targeted solutions (such as adjusting the appropriate pipe diameter, controlling the pipe inclination angle, establishing an intelligent management system, utilizing multiphase flow mathematical models, and timely pigging) to ensure long-term stable and efficient system operation. This has significant implications for enhancing the reliability and economic benefits of extraction and transportation systems, and achieving smart energy development.

Key words: oil field gathering and transportation system; multiphase mixed transportation; pipeline stability; flow pattern control; optimization design

1 油田多相混输管道运行中存在的主要问题

多相混输凭借其资源优化、操作优化及设备节能等优势被广泛应用于石油开采系统及储运系统集输过程中。然而，在该多相混输技术的应用过程中，由于其导致的复杂流体行为及其相应的不确定性所带来的管线安全性问题逐渐加剧。

多相流动过程中，油、气和水等不同相在管内输送，流动过程极不稳定，出现不同类型流型（段塞流、泡状流、环状流等）交替转化，这就会造成压力升高、局部反位、气液交换中断等一系列问题，进而造成管输系统晃动、水击、泵站喘振等，这些突变过程将影响到流量波动，还可能对设备造成损害，增加了管道疲劳程度，会威胁整套集输系统安全。而管道布置不善则可能是导致运行工况不稳定的最主要原因。比如弯曲角过多、急倾度、无排水孔等情况均会产生气滞留、液体堆积形成气阻、液块等问题，在运输途径中有长输管段、高差、不均等热效应的问题，容易造成局部气液分离截断并增加不均程度，增加运行工况的强烈波动。此外，伴随物质性质变化问题，比如在

低温环境，重原油容易发生凝堵、乳化液带水量多，油水黏度均升高，油水摩擦增加；在含气量大的情况下易造成气液失衡，造成突发性堵塞或闭止等。最后，伴随气水比的变化，泵站工作状态难控、系统自适应能力弱，运行风险积累增加。长期处于运行过程中，锈蚀、沉降等是比较普遍的。受到CO₂、H₂S等有毒气体的侵蚀作用，碳钢内部逐渐腐蚀，或是出现局部性破损，亦或是壁厚变小，出现漏洞的情况。另外石油中的杂质颗粒、砂子和结晶物会在管道表面堆积，造成流动面积较小，摩擦阻力增大，系统压力小，这样会导致运送效率降低，而且还会增加流动故障率。

综上，多相混输管道中的不稳定主要是由于流动形态错乱、流体形态不一致、流体种类繁杂、运行性能不佳等多方面的综合因素影响，是各种影响因素的交叠和影响机制的叠加而产生的复杂现象，多相混输管道的多发性和连续性导致了管道的极不稳定性。

2 多相混输管道稳定性构成因素及对策建议

2.1 多相混输管道稳定性的影响因素

油气混合物多相管道输送系统由多种因素耦合而

成，属于多耦合复杂系统。输送管道设计、管体结构性能、管道运行状态是多相混输过程中影响整个集输系统是否平稳安全运行的重要环节。

由于多相流质态的复杂和行为的不可知性，流体成分变化(即：多相组成形式的变化，如泡状流、段塞流、环状流等)及其数量的动态变化，局部管道速度或油——水比发生突变时，流型易发生转变，由此可能引起压力波动、液体积累、气体陷闭等问题，此外，流型不稳定，即断塞流会引起较严重的周期性压力波动，如果不能及时耗散这种能量则可能产生管道共振或者水击效应。管道管径的大小的选择也至关重要。由于弯头、三通等地方因存在局部干扰而成为流速不均匀和阻力集中的部位；斜率差异过大或者没有排液设施则有可能造成液体堆积形成液塞，增加系统的阻力损失和加大管内扰动量。此外，不适当选择管径会导致某些地方流速过慢或过快，此时可能产生流态不稳或界面模糊现象。最后，管输操作环境也可能影响管线流动稳定性。在极地地区温度降低可使原油黏度增加，同时石蜡结晶析出，在管道内结垢，增加了流动阻力；在沙漠、海山等特定地势状态下，地壳压力的改变和地壳下沉会改变管容变化，进而对管道变形以及受力状况产生影响，导致流动稳定性受到影响。

因此，若对混合多元运输系统中缺乏相应的规划和运作管控，该管线也势必会成为整个石油采集运输系统丧失稳定性的“关键节点”，限制整个石油采集运输系统的效能和稳定。

2.2 提高多相混输管道稳定性的具体措施

2.2.1 合理选择管径与管材

在多相多流的管道系统设计中，选择合适的管径是确保整个管道系统能够稳定运行的重要环节之一。管径大小会影响流体流速、流动形态、摩擦损失率及能量消耗以及设备负荷，过小的流速会使单位时间内通过管线单位面积的质量流量较小，导致局部流速增大、压力降低、湍流增强、剪切力增强等一系列后果，除增加泵房压力外，可能产生气液析离、乳化或界面不稳定性等问题；而管径过大，即使摩擦损失低，但流速过低，可导致气体浮上、液体沉淀，导致流体分层，增加液体积聚、节流的机会，引发流体的堵塞、间歇及振荡等问题，故应综合考虑产量、气液比、输送距离、高差、介质特点等因素，采用多相流动力学以及CFD数值模拟的方法预测不同工况下流态，得到合理的经济管径。在实际运行中通常会将多相混合输送系统的气体的速度控制在一定范围内，即 $6\text{m/s} \sim 12\text{m/s}$ ，可以达到既能够保证系统有足够的动力运输流体又有足够的能力防止流体积聚的效果。同时控制流体速度

也很重要，当流速过高会导致运行不稳、震动加剧和能量消耗增多。

至于管材方面，它决定了系统可以使用多长时间和达到的安全等级。由于石油开采通常在具有腐蚀性的地方，例如二氧化碳、硫化氢等物质；夹杂固体，如砂、蜡等，同时管道也具有一定的弯曲度。所以在正常工况下，可以选择管道内衬聚乙烯(PE)或环氧树脂涂层的复合碳钢管道以提高防腐蚀性和减小管道摩擦系数，但是如果处在高温的腐蚀环境下，更合适的是双金属复合管、不锈钢管或工程塑料材质的复合管(如PVDF覆层)具有良好的耐高温、抗化学性功能，可用于酸性气井及高温注水井。清洁、清扫功能很好，能够保证稳定地持续运行。内表面需要具有高度的光滑度和抗附污性，以便能够降低诸如蜡质、黏泥、矿物质等附着物的沉淀，降低清扫次数和管道摩擦系数的增加。有些管道例如熔融环氧钢管或是内衬高级耐磨层的管道，能将摩擦系数降为非常低，提高传输性能，同时具有良好的清扫功能。

综上所述，管道直径与材质配置合理，可从根本上杜绝不稳定流产生，并提高系统对外扰的吸收度；同时可以显著提高管道系统的经济性、安全性与维护性等，这是打造一个稳定高效多相混输管网运行系统的基本原则。

2.2.2 优化管道布局与坡度

合理、科学的管道设置和布控以及斜度的高低，是提升多相混输系统运行可靠性的重要部分，否则在地理环境状况和流体运动的影响下可能出现气态积存、液态积存、局部真空等问题，因此在进行初期设计时应结合地勘资料绘制三维立体规划和确定斜率，对于大型长距离运输系统应设置合理的斜率控制点，确保流体处于连续流动的状态，例如在存在较大高程位置时，建议通过逐级上升或者下降方式进行管道布设，同时必须配备自动排水装置，避免低洼处存在液体积聚形成液柱；垂直管道的部分应配置液面消除结构或者气、液分离装置，从而提升上行部分的可靠稳定性；拐角和T型的构造尽量不要过于密集，否则会形成较大的扰动，造成剪切带及局部高压波动，通过运用大弧角的拐角能够降低震荡、实现流动路径更加平稳，同时也可配给一定地缓速区或调节阀门，方便中和流体转变前后流速差，减少瞬间流动影响。

同时，在设计时应充分考虑到管道的吹扫、检修的可操作性，例如设计合理的清管线口、检测孔、旁通支路等，形成良好可检修的结构。通过在结构上采取优化措施，有力提高流场稳定性及后期的安全运行、检修的保证。

2.2.3 构建动态监测系统

针对多相混输管道系统实际运行过程中存在的流量波动、温度波动和流态干扰现象，实时监控系统可以针对具有稳定指标参数进行实时跟踪监控预警。该系统要通过整合变量传感器网络、数据采集模块、智能分析模块以及执行控制方案形成“感知——传输——分析——管理”于一体的智慧运营体系。

对某些特定区域如收点的放空闸门、流程转弯、海拔变换区、泵房出口等增加传感器的布置以覆盖盲区，该区域可监测的关键变量是压力、速度、温度、振动和组分及含水量等。采用高阶传感技术如光纤传感、电磁流量传感和超声波边界探测器来增加采样的密度和稳定性。所有采集的数据必须实时传输至中控室，并利用SCADA系统对采集数据进行可视化显示和趋势分析。建立流型随时间变化的实时动态模型以识别段塞流的早期特征、液体积聚速率、部分堵管发展趋势等实现提前报警和自动化操作（如打开排放阀门、泵速调节或降低部分降压操作）。系统还可连接历史数据进行人工智能模型训练实现流型预测、故障诊断、策略优化等建议。建立动态监测系统提高生产安全性和可靠性，为石油开采集输管网的数字化、智能化的变革奠定基础，符合“智能油田”的建设理念。

2.2.4 引入多相流数值模拟技术

数值模拟法的迅速发展使得其在多相混输管道的设计和运行中应用得越来越广泛，尤其是利用CFD工具可以预测流动过程并优化结构以满足不同的运行策略。多相流数值模拟技术能够准确地描绘速度场、压カ场、界面运动和局部湍流强度，揭示肉眼看不到的流动特征；在设计过程中通过改变不同的管径、坡度和材料性质来确定易堵塞、集结和阻碍区域，并提供确定排水孔、排放阀、缓冲部分的位置。并可以根据模拟结果对管道路线和结构参数做出相应修改，使其与实际流动状况更为贴合。在运行过程中通过收集动态数据对模型进行调整，从而动态模拟工作条件及评价调试（调整泵速的频率、开大旁通通道）措施对整个系统稳定性的影响。例如某西部油田发现输油主干线冬季在特定位置有结蜡的可能，在冬季来临之前安装了加热器设备成功避免了一次因结蜡导致的停工输送事故。

2.2.5 实施周期性清管与管道维护制度

由于长年使用，管道容易产生结蜡、腐蚀、沉淀等，直接影响其流通能力和稳定性。建立并开展一个科学有计划的清洁维护模式对提高多模式混合管道的安全性和延长使用周期极为必要。管道的清污有利于除去管道内壁上的蜡、铁锈、砂等污物，使壁面保持粗糙度，

降低摩擦力、避免因流动速度变化而引起的地方性压力过高和流动模式的变化。推荐采用智能管道清洗设备除污的同时可收集相关的信息以进行腐蚀情况、沉积物深度等分析、流体影响特征为管道的健康评价。根据特定的环境要求制定有效的管道清洁频率，例如，含蜡多的原油、高矿化度的水、含有腐蚀性气体的管道要进行频繁的清洗，如10~20天清洗一次，而对水中含量少且又无其他杂物的管道，清洗频率可以延长。同时进行管道完整性检验，采用超声波测厚、磁场检测、管道内窥图等方式，及时了解壁面损伤、开裂或腐蚀裂损等风险。

对于检出的问题段，可在检修期间进行焊接/更换/内衬涂层等维修操作，形成有效的维修保养体系，采用“清管+检测+修复”的保养方式实现运营风险管理，降低系统故障与维修成本，可最大程度提升多类型混合输送管道的可靠性与安全性。

3 结束语

多相混输技术是当前石油开采的主要技术手段之一。多相混输技术在提高资源利用率、节省生产成本中的价值不言而喻。但在管线应用中，受该介质本身特性及多重因素影响，使其在实际应用中的难点较多。本文以实际问题出发，深入分析了管道稳定应用的影响因素，针对性地给出了多相混输系统管径、管材选择、管廊布局优化、动态监测以及三维建模分析计算、清管除锈等改进措施。结论表明，在完善“设计——施工——运维”过程中，建立稳定的管体管控体系，可明显强化全集输网络的稳定性和可靠性。展望未来，要更好结合智能感知、智能算法和数字化仿真的深度融合，以便更好地主动预测管道运行状态并在适当时间进行智能化调控，从而助力提高石油开采向智能化、智慧化、高效化方向发展。

参考文献：

- [1] 张颜如.高含水油田集输系统节能措施应用分析[J].石油石化节能与计量,2023,13(12):39-43.
- [2] 曹秋娥,马银歌,李艳婷.油田集输工艺技术与节能降耗策略[J].化学工程与装备,2023,(11):72-74.
- [3] 朱源,张巧生,张鹏飞,等.长庆页岩油多相结蜡特性与清管周期研究[J].油气田地面工程,2023,42(11):28-33.
- [4] 况昕,陈希,侯辰光,等.海上石油平台多相混输泵选型优化方案分析对比[J].天津科技,2023,50(08):39-42.
- [5] 郑美玉,孙杨杨,赵小宇,等.中俄原油管道漠大线冻土稳定性评价[J].科技创新与应用,2023,13(08):1-4.