

# 石油工程地面建设关键技术进展与前沿趋势分析

郝玉冬

新疆油田公司百口泉采油厂 新疆维吾尔自治区 克拉玛依 834000

**【摘要】**：本文深入分析了石油工程地面建设领域的创新发展，重点探讨了智能化、绿色低碳、提质增效及油气集输处理等方向的创新成果，并展望了 AI 大模型、CCUS 规模化、新能源融合等前沿趋势。同时，文章也指出了数据基础薄弱、环保压力加大等挑战，并提出了产学研协同、标准体系建设等对策建议，为推动石油工程地面建设行业高质量发展提供了重要参考。

**【关键词】**：石油工程地面建设；智能化技术；绿色低碳；提质增效；前沿趋势

DOI:10.12417/2811-0536.26.03.053

## 引言

石油工程领域目前正承受着多方面的挑战。在资源条件上，低品质油气藏的比例不断攀升，地面工程必须面对如高含硫、高矿化度等复杂的工作环境；在环保限制方面，国家对于碳排放的管理政策日益严格，油气田对挥发性有机化合物（VOCs）的处理以及碳减排目标对传统工艺提出了根本性的挑战；在技术转化层面，实验室的研究成果转化为实际工程应用的时间周期较长，而不同学科之间的技术融合则面临机制上的阻碍。在这样的形势下，全面梳理地面工程关键技术的进展情况，预测前沿技术的发展动向，并提出相应的解决方案，对于促进石油工程行业向高效、低碳和智能化转型具有极其重要的实际价值。

## 1 石油工程地面建设关键技术进展

### 1.1 智能化技术进展

#### 1.1.1 AI 与大数据在地面工程的应用

人工智能在石油地面建设中的应用，如深度学习优化算法，显著提升了油气分离效率，并降低了能耗。某油田联合站通过强化学习模型提高了分离器液位控制精度，减少了停产损失。全流程能量流网络模型帮助识别能耗点，降低了集输单耗。此外，可以通过对历史生产数据、设备参数以及地质信息的整合，构建地面系统效能评估模型，从而能够准确识别低效环节。在胜利油田某区块，数据挖掘技术揭示集输管网存在“近稠远稀”的流量分配不均问题，经过针对性的改造，系统运行效率提高了 22%，并且投资回收期缩短至 3.5 年。类似地，在长庆油田的应用中，通过关联分析含水率变化与管网腐蚀速率，提前预测出 3 个潜在泄漏风险点，有效避免了重大安全事故的发生。

#### 1.1.2 数字孪生与全生命周期管理

数字孪生技术实现了对地面工程的精确数字化映射，将物理实体转化为虚拟空间中的对应模型。在站场设计初期，通过建立综合地质环境、工艺流程和设备性能的多物理场相互作用模型，能够在极端工况下预先模拟系统的反应。例如，塔里木油田某天然气处理厂利用数字孪生技术进行方案比较，将二维设计的碰撞检测效率提高了 80%，并通过对关键设备布局的优化，施工周期缩短了 25%。在施工过程中，结合建筑信息模型（BIM）和地理信息系统（GIS）的数字孪生平台能够实时对比施工进度与计划之间的差异，某海外项目应用此技术后，返工率减少了 40%，同时节省了 1800 万美元的施工成本。运维模式革新依托全生命周期管理平台架构，实现向预测性维护的过渡。此架构涵盖感知层（布设超过十万传感器）、数据层（运用分布式存储技术）、模型层（整合设备退化模型与故障树分析模块）以及应用层（提供直观的运维界面）。某国际石油企业采纳此平台后，设备故障预警的精准度提升至 85%，非计划停机时间降低 35%。尤其在管道运维领域，结合内检测数据与数字孪生模型，能精确推算腐蚀缺陷的扩展速度，预测剩余寿命的偏差率维持低于 5%。

### 1.2 绿色低碳技术进展

#### 1.2.1 CCUS 技术与低碳转型

通过优化胺溶液配方，碳捕集技术已实现 92% 的 CO<sub>2</sub> 吸收效率，并将能耗降低了 20%。某炼化企业应用此技术，年捕集 CO<sub>2</sub> 量达到 45 万吨。膜分离技术在处理低浓度气源方面表现出色，其中中空纤维膜组件的 CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 选择性超过了 300，适用于伴生气中的

CO<sub>2</sub>脱除。在运输环节，超临界 CO<sub>2</sub>管道输送技术的应用使运力提高了 3 倍，同时将单位能耗降低了 40%。CCUS 技术与油气田开发的结合模式，促进了资源的循环使用。采用 CO<sub>2</sub>驱油技术不仅能提升 10%-15% 的原油采收率，还能永久性地封存 CO<sub>2</sub>。大庆油田某个区块实施 CCUS 项目后，每年封存 CO<sub>2</sub>30 万吨，原油产量增加了 2.1 万吨。在咸水层封存方面，我国通过建立地质封存潜力评估系统，已经在鄂尔多斯盆地确定了封存容量超过 10 亿吨的示范区域。2025 年油气新能源地面工程技术交流会上透露，国内首个百万吨级的 CCUS 集群项目已经实现了全流程的国产化，捕集成本降低至每吨 280 元，为规模化应用奠定了坚实的基础。

### 1.2.2 节能降耗技术创新

能源节约型分离技术显著提高分离效率。通过旋流和重力相结合的三相分离技术，分离时间较传统设备缩短至八分钟，处理能力提升达五成，能耗减少约四分之一。在海上平台应用该新型高效分离器后，每台设备年节省电量达 12 万度。利用变频调速技术，对动力设备进行精确能耗管理，抽油机采用永磁同步变频系统，功率因数从 0.65 提升至 0.96，空载损耗降低至七成。构建多级能源梯级利用的余热回收系统。在加热炉的排烟系统中安装陶瓷膜余热锅炉，回收超过 300℃ 的高温烟气余热，产生的饱和蒸汽用于伴热，使热效率提高 15%-18%。采出水余热回收技术利用板式换热器提取 40-60℃ 水温中的热量，为集输管道提供伴热，某油田应用该技术后，年燃气消耗减少至 1200 万立方米。能耗监测平台采用物联网加边缘计算结构，实现从井口到外输的全过程能耗计量，数据采集频率高达每秒 1 次，为节能诊断提供精确数据支持。

### 1.3 油气集输处理技术创新

#### 1.3.1 集输系统优化与简化

常温输送技术打破了传统加热集输的局限。通过引入高效降粘剂，原油粘度显著降低，从 10000mPa·s 降至 500mPa·s 以下，实现了从井口至处理站的常温输送。某油田采纳此技术后，年度燃气节约量达 1800 万立方米。多井串联输送工艺特别适合低产井的集输需求，通过优化管网布局，将单井输送转变为多井串联，有效减少了增压点达 60%，并使系统总压降降低 20%。针对低渗透油田的集输策略，强调系统的弹性设计。实施“分压集输、分级处理”工艺，依据井口压力差异进行分组集输，有效避免了高压井的节流损耗。某低渗透油田应用此方案后，集输效率提升了

25%，单井产能释放率增加了 18%。引入 CFD 数值模拟技术于水力计算方法，能够精确预测复杂地形下的流场分布。某山地油田通过优化管道走向，减少了 3 处翻越点，年减少动力消耗大约 500 万千瓦时。

#### 1.3.2 管道完整性管理技术

构建多层次的腐蚀防护体系，管道外部通过三层 PE 防腐层与阴极保护的结合，有效将管道腐蚀速度降至 0.001mm/a 以下；内壁腐蚀控制则通过注入缓蚀剂与运用智能清管技术，例如在高含硫管道上应用后，内壁腐蚀速度减少了 80%。通过风险评估技术实现动态安全监管，依据 API 581 标准研发的风险评估模型，能够对第三方破坏、腐蚀、疲劳等风险因素进行量化计算，某管网应用此模型后，维修费用减少了 35%，事故发生率降低至 60%。构建全生命周期安全监控闭环体系。在设计环节，引入可靠性基础设计（RBD）策略，关键设备的安全系数提高至 20%；在施工环节，采纳自动化焊接及非破坏性检测技术，一次性合格率高达 98.5%；在运维环节，打造完整性信息库，记录管道从建设、检测到维修的全程数据，辅助进行剩余寿命评估。在检测技术领域，配备多通道智能清管器，能够同步探测腐蚀、裂纹、形变等隐患，定位准确度在 ±0.5 米范围内，检测效率提高 50%。

## 2 石油工程地面建设前沿趋势分析

### 2.1 智能化技术深化趋势

#### 2.1.1 AI 大模型与行业应用

油气行业专用的大型模型正迅速向特定场景的应用转化。在地质学解释的范畴内，采用 Transformer 架构的三维地震数据解析模型能够自动探测断层、盐丘等地质形态，其解释速度相较于传统人工方法提高了 10 倍以上。在某页岩气田实施该技术后，水平井的靶体命中效率由 78% 增至 92%。在设备故障检测领域，结合多种数据模式的大模型能够集成振动、温度、声音等传感器的信号以及历史故障记录，实现对往复压缩机气阀故障的早期警报，准确率高达 91%，比传统机器学习模型提高了 23 个百分点。在深度学习大模型训练过程中，数据治理难题尤为突出。油气行业的数据特点表现为样本量小、数据模态多样且专业性极强，如单井压裂数据通常仅有寥寥千条样本，涵盖测井曲线、岩心图像、生产动态等不同类型的数。刘院士于 2025 年油气人工智能会议上强调，要突破小样本学习的难题，需结合领域知识图谱和迁移学习技术，实现数据与知识的双重驱动以优化模型训练。目前，某能源企业与高校合作，已构建包含 12 万个实体

和 35 万条关系的油气专业知识图谱,有效提升了小样本场景下模型的收敛速度,提高了 40%。在处理多解性问题方面,采用贝叶斯神经网络的不确定性量化技术,能够输出带有置信区间的预测结果,为油藏开发决策提供了科学依据。

### 2.1.2 云边协同与智能决策

“云端-边缘-终端”架构对油气田智能决策系统进行重塑。在云端,部署行业级大模型和整体优化算法,承担长期趋势预测和战略决策任务,例如依据油田整体生产数据的产能规划;在边缘节点部署轻量化模型,负责实时数据处理和局部优化,例如井口压力的即时调整;终端设备专注于数据收集和反馈,构建起“瞬间响应-分钟级调整-小时级决策”的三级协同体系。华为智慧作业区方案在某一油田的实际应用中,该架构有效减少了数据传输带宽需求达 65%,将决策延迟从分钟级缩短至秒级。

## 2.2 绿色低碳技术创新趋势

### 2.2.1 CCUS 规模化与资源化

CCUS 技术正迈向“捕集-利用-封存”的综合性协同模式。在提高油田采收率方面,通过使用化学添加剂成功降低了 CO<sub>2</sub> 与原油的最小混相压力,使 MMP 降低 15%-20%,并提升了波及系数约 12 个百分点。然而,CCUS 产业化仍面临经济性和安全性挑战。据 2025 年国际碳捕集创新交流大会透露,目前捕集成本约为 300-600 元/吨 CO<sub>2</sub>,管道运输成本占项目总投资的 25%-35%。技术突破方向包括新型胺基吸收剂的研发,其再生能耗从 3.5GJ/吨 CO<sub>2</sub> 降至 2.8GJ/吨,以及超临界 CO<sub>2</sub> 管道输送技术的流动保障,以解决水合物堵塞和腐蚀控制问题。在监测技术方面,分布式光纤传感系统能实现封存区域 CO<sub>2</sub> 运移的三维监测,定位精度 ±1 米,响应时间 <10 秒,符合《碳封存地质场地监测技术要求》的安全标准。

### 参考文献:

- [1] 胡学均.石油工程地面工程施工技术措施[J].化学工程与装备,2021,(04):88-89.
- [2] 张树坤.浅谈石油工程地面建设项目工程施工技术发展现状及提高策略[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(17):242-243.
- [3] 路海涛,杨景丽,郭靖.油田地面建设设备安装与集输管道施工技术[J].化工设计通讯,2019,45(01):20.
- [4] 吉喆.石油工程地面建设项目工程施工技术发展问题及对策[J].化工管理,2018,(28):172-173.
- [5] 王小庆.探析油田地面工程建设技术现状与发展趋势[J].化工管理,2018,(27):167.
- [6] 金鑫.关于对石油工程地面工程施工技术的分析[J].化工管理,2018,(21):157.
- [7] 丁诗.石油工程地面工程施工技术研究[J].化工设计通讯,2018,44(05):30.
- [8] 王丽华.高含水期油气田地面建设工程新工艺技术措施[J].化工设计通讯,2018,44(03):31.

### 2.2.2 新能源与传统油气协同

结合太阳能与油气田的多元化应用模式,电力供应方面,通过实施“光伏发电+储能+柴油发电”的复合供电体系,在某偏僻油田的实际应用中,实现了离网供电成本的降低,从每千瓦时 1.8 元降至 0.75 元,并实现了年减排二氧化碳 1800 吨的环保效果。在热能利用方面,槽式太阳能集热器输出的 80-150℃ 中温热能,取代了燃气加热炉对原油的伴热需求,系统光热转换效率高达 58%,在另一油田的应用中,每年可节约天然气 360 万立方米。地热能的开发呈现出多级利用的特点。在高温地热资源(超过 150℃)的利用中,采用有机朗肯循环(ORC)发电机组进行发电,其发电效率可达到 18%-22%;对于中等焓值的地热(介于 90℃至 150℃),则驱动吸收式制冷设备,为集输站提供冷却需求;而低温地热资源(低于 90℃)则直接应用于原油的集输伴热。在“油气新能源融合”的示范项目中,通过地热与太阳能的结合,某油田实现了站内 70%的用能需求,并将综合能源成本降低了 32%。风光储一体化系统的创新设计采用了“源荷互动”的调度策略,依据抽油机的作业周期动态调整风能的输出,有效降低了弃风率从 18%至 6%,显著提高了系统的经济效益。

## 3 结语

在石油工程地面建设的领域内,技术革新正带来显著的飞跃。智能化技术的应用已从个别环节扩展至全方位覆盖,AI 与大数据的应用使得生产运行效率提升至 15%-20%,而数字孪生技术则重构了整个生命周期的管理模式。物联网与智能装备集群共同构筑了一个全方位的感知网络。在绿色低碳领域,CCUS 技术实现了百万吨级工程的广泛应用,节能降耗技术使系统能耗降低 15%-25%,环保处理和资源循环技术推动了行业向清洁生产的转变。