

基于系统工程思维的油田全生命周期采油策略优化

张志永

大港油田公司第一采油厂第二采油作业区 天津 300280

摘要: 随着全球能源格局的深刻变革与油气资源开发难度的日益增加,传统以单一技术或短期经济目标为导向的油田开发模式已难以满足高质量、可持续发展的新要求。本文旨在将系统工程(Systems Engineering, SE)思维引入油田开发领域,构建一个覆盖勘探、评价、开发、生产直至废弃全生命周期的综合性采油策略优化框架。通过将油田视为一个由地质、工程、经济、环境和社会等多要素构成的复杂巨系统,运用系统分析、综合集成、动态反馈与多目标协同等核心方法,对各阶段的关键决策进行统筹规划与迭代优化。研究重点探讨了系统边界界定、多学科模型耦合、不确定性量化、多目标权衡及数字孪生技术应用等关键问题。研究表明,基于系统工程思维的采油策略优化是实现油田价值最大化和可持续发展的必由之路。

关键词: 系统工程; 油田全生命周期; 采油策略; 多目标优化; 数字孪生

引言

石油是现代工业“血液”,其稳定供应意义重大。但历经长期开发,全球易开采常规油气资源渐枯竭,剩余资源特征复杂,且国际油价波动、环保法规严苛、碳中和目标提出,给传统油田开发模式带来巨大挑战。传统油田开发流程分阶段,各阶段由不同专业团队负责,决策常局限于本专业最优或短期效益,这种“分段式”“孤岛式”模式易缺失全局视角,造成不利路径依赖,增加成本与环境负担。在此背景下,亟需全新方法论。系统工程(SE)作为跨学科方法,强调从整体出发实现多维度最优平衡。将其思维应用于油田开发,是将油田全生命周期视为有机整体系统,内部要素相互关联且与外部环境交互。本文核心贡献在于构建基于SE思维的油田全生命周期采油策略优化理论框架,该框架兼顾技术先进性与管理流程系统性、决策逻辑整体性,为复杂油气田开发提供科学方法论指导。

1 系统工程思维与油田全生命周期管理的契合性分析

1.1 系统工程的核心内涵

系统工程并非一门具体的技术学科,而是一种组织管理的核心技术。其经典V模型清晰地描述了从用户需求(左侧下行)到系统实现与验证(右侧上行)的全过程。SE的核心活动包括:①需求分析:明确系统需要满足的功能、性能、约束等。②功能分析与分配:将高层需求分解为可执行的子功能,并分配给系统的各个组成部分。③设计综合:构思并整合多种可行的解决方案。④验证与确认:确保设计方案满足规定的需求,并确保最终产品满足用户的实际使用意图。贯穿始终的是迭代与反馈机制,允许在项目进程中根据新信息不断修正和完善设

计方案。

1.2 油田作为复杂巨系统的特征

一个油田在其全生命周期内,展现出典型的复杂巨系统特征:①多要素耦合:涉及地质(储层非均质性、流体性质)、工程(钻完井、增产、举升、集输)、经济(投资、运营成本、油价)、环境(碳排放、水资源消耗、废弃物处理)及社会(社区关系、法规合规)等多个维度的要素,它们之间存在复杂的物理、化学、经济和法律耦合关系。②强不确定性:从地下储层参数的随机性,到未来油价的波动性,再到技术突破的不可预测性,不确定性贯穿始终,使得任何静态的开发方案都面临失效的风险^[1]。③长时序动态演化:油田开发周期长达数十年,期间系统状态(如压力、饱和度、产量)随时间不断演化,早期决策的后果将在后期显现,形成强烈的路径依赖。④多目标冲突:开发者通常需要在最大化累积产量/采收率、最小化全生命周期成本、缩短投资回收期、降低环境足迹等多个目标之间进行权衡,这些目标往往是相互冲突的。

1.3 契合点:SE思维对油田开发痛点的回应

正是由于上述特征,SE思维为解决油田开发中的核心痛点提供了天然的解决方案:整体性对应“分段式”管理的割裂问题,强制要求建立全局视角。迭代性对应“一次性”决策的僵化问题,通过动态反馈机制适应不确定性。多学科集成对应“专业孤岛”问题,促进地质、工程、经济等领域的深度协同。需求驱动对应“技术驱动”或“经验驱动”的盲目性,确保所有活动都服务于最终的价值目标。因此,将SE思维融入油田全生命周期管理,不仅是方法论上的创新,更是应对当前行业挑战

的必然选择。

2 基于SE思维的全生命周期采油策略优化框架

本文提出的优化框架遵循SE的V模型逻辑,但针对油田开发的特点进行了定制化设计。该框架的顶层输入是油田开发的总体价值目标,这通常是一个多目标集合,包括经济价值(NPV最大化)、资源价值(采收率最大化)、战略价值(保障供应安全)和可持续价值(ESG表现)。框架的核心是贯穿全生命周期的四个核心支柱:

2.1 系统边界与接口定义

这是SE工作的起点。必须清晰界定所研究油田系统的物理边界(地理范围、垂向层位)、时间边界(从何时开始到何时结束)以及逻辑边界(包含哪些子系统,如地下油藏、井筒网络、地面处理设施、供应链等)。更重要的是,要明确定义系统内部各子系统之间以及系统与外部环境之间的接口^[2]。例如,钻井工程子系统向油藏工程子系统提供的接口是“完井质量与产能指数”,而油藏工程子系统向地面工程子系统提供的接口是“预期的油气水产量剖面”。清晰的接口定义是后续多学科协同和模型集成的基础。

2.2 多学科模型的综合集成

传统上,各专业使用各自的模型(地质模型、数值模拟模型、经济评价模型、设备可靠性模型等),数据格式不一,更新不同步。在SE框架下,需要构建一个统一的、可互操作的集成模型平台。这个平台应能:①数据同源:所有模型共享同一套经过严格质控的主数据(MasterData)。②模型耦合:实现地质-工程-经济模型的双向甚至多向耦合。例如,数值模拟的结果(产量、含水率)可以实时驱动经济模型计算现金流,而经济模型的净现值(NPV)结果又可以作为优化算法的目标函数,反过来指导数值模拟调整开发方案。③尺度融合:能够在宏观(全油田)与微观(单井、近井地带)尺度之间进行信息传递和模型嵌套。

2.3 全生命周期的不确定性量化与管理

不确定性是油田开发的最大敌人。SE框架强调对不确定性进行显式建模和主动管理。一是来源识别:系统地梳理地质不确定性(孔隙度、渗透率分布)、工程不确定性(单井产能、设备故障率)、市场不确定性(油价、成本)等。二是量化表征:采用概率分布(如蒙特卡洛模拟)、模糊集、情景分析等方法对不确定性进行量化。三是传播分析:利用集成模型,分析不确定性如何从上游(地质)传播到下游(经济指标),识别对最终目标影响最大的关键不确定性源(敏感性分析)。四是鲁棒性与柔性设计:基于不确定性分析结果,设计鲁棒性方

案(即在各种可能情景下性能都相对稳定)和柔性方案(即保留未来根据新信息调整策略的选项,如预留加密井位、模块化地面设施)。实物期权理论(RealOptions)是评估柔性价值的有效工具。

2.4 多目标协同优化与决策支持

油田开发的终极目标是多维的。SE框架采用多目标优化(Multi-Objective Optimization, MOO)方法来寻找帕累托最优解集,即在不损害某一目标的情况下无法再改进另一目标的方案集合。①目标函数构建:将经济指标(NPV、IRR)、技术指标(EUR,最终可采储量)、环境指标(单位产量碳排放强度)等量化为数学表达式。②约束条件设定:包括技术可行性约束(最大注采比、井距限制)、经济约束(CAPEX/OPEX预算)、法规约束(排放上限、安全标准)等。③智能优化算法:应用遗传算法(GA)、粒子群优化(PSO)等智能算法,在庞大的方案空间中高效搜索帕累托前沿。④决策支持:将帕累托前沿可视化呈现给决策者,并结合专家判断、风险偏好和战略考量,从众多最优解中选出最符合当前情境的实施方案。

3 关键阶段的SE实践要点

3.1 勘探与评价阶段:奠定系统基础

此阶段的核心任务是降低地质不确定性,为后续开发提供可靠输入。SE思维体现在:

①价值导向的勘探部署:不仅评估圈闭的地质成功概率,更要初步估算其潜在的经济价值和在整个资产组合中的战略地位,优先部署高价值目标。②一体化评价:在发现油气后,立即启动多学科联合评价,同步开展地质建模、储量评估、概念开发方案筛选和初步经济评价,避免地质评价与开发评价脱节。③数据采集策略优化:根据后续开发决策的关键信息需求,反向设计评价井的取心、测井和试油方案,确保获取的数据能最大程度地减少对开发方案选择的不确定性。

3.2 开发方案设计与实施阶段:系统综合与基线确立

这是SE应用最密集的阶段,目标是确立一个兼顾近期效益与远期潜力的最优基线方案。①概念筛选与优选:基于集成模型,快速生成并评估多种开发概念(如天然能量开发、注水开发、注气开发、热采等),综合考虑技术成熟度、经济性、实施风险和环境影响。②详细方案优化:对选定的概念进行精细化设计,包括井型(直井、水平井、分支井)、井网部署、注采参数、地面设施规模等。利用多目标优化算法,在投资、产量剖面、采收率之间找到最佳平衡点^[3]。③柔性设计嵌入:在方案中明确标注未来的决策节点(Decision Gates)和备选方案

(ContingencyPlans)。例如,设计一个“观察-学习-响应”的注水方案,根据早期生产动态决定是否转为聚合物驱。

3.3 生产运营与调整阶段:动态反馈与持续优化

油田投入生产后,系统进入动态演化阶段。SE的迭代和反馈机制在此阶段至关重要。①实时数据驱动:利用物联网(IoT)技术,实时采集井口、管线、处理厂的生产数据,并与地下油藏动态模型进行历史拟合。②滚动式规划:定期(如每年)基于最新的油藏认识、设备状态和市场信息,对未来的5-10年开发计划进行重新优化和调整。③提高采收率(EOR):将EOR项目视为对原系统的一次重大升级。在SE框架下,EOR的时机选择、技术路线和实施方案都需要重新进行多学科集成评估和多目标优化,确保其与现有生产系统的无缝衔接和价值最大化。

3.4 废弃与退役阶段:闭环思维与价值回收

SE强调系统的全生命周期闭环。废弃阶段不再是简单的“终结”,而是价值回收和责任履行的最后环节。①早期规划:在开发方案设计之初,就应初步考虑未来的废弃方案和成本,并将其折现计入全生命周期经济评价。②环境修复与社会责任:将土地复垦、地下水保护、社区安置等环境和社会成本纳入系统目标函数,确保责任的退出^[4]。③资产再利用:探索废弃井筒用于地热开发、二氧化碳封存等新用途的可能性,实现资产价值的二次创造。

4 数字孪生:SE框架的技术赋能器

数字孪生(DigitalTwin)技术为SE框架的落地提供了强大的技术支撑。一个油田的数字孪生体是其物理实体在虚拟空间的高保真、动态、实时映射。它完美地承载了SE框架所需的集成模型、实时数据、仿真预测和优化决策等功能。①数据底座:整合静态(地质、构造)和动态(生产、监测)数据,构建统一的数据湖。②多物理场模型:集成地质力学、流体力学、热力学等多学科机理

模型,实现对油田复杂物理过程的精确模拟。③AI与机器学习:利用AI算法加速历史拟合、自动识别生产异常、预测设备故障,并辅助优化算法更快收敛。④可视化与人机交互:通过三维可视化界面,让决策者直观地理解系统状态、方案对比和优化结果,极大地提升了决策效率和信心。可以说,数字孪生是实现基于SE思维的全生命周期采油策略优化的理想载体。

5 结语

本文系统论述了将系统工程思维应用于油田全生命周期采油策略优化的必要性、理论框架、关键技术及实践路径。研究指出,整体性优于局部最优,打破专业壁垒建立全局视角可避免全局次优;动态性优于静态规划,构建闭环反馈机制能增强开发策略的韧性与适应性;多目标协同是实现油田可持续发展的关键,需在经济、技术等多重目标间找平衡;数字孪生是赋能基石,为系统工程框架实施提供工具平台。展望未来,随着人工智能、大数据等技术的进一步发展,基于系统工程思维的油田开发将向智能化、自主化演进,“智慧油田”有望实现近乎实时的自我感知、诊断、优化和调整,以最高效、安全、绿色的方式开发油气资源,这不仅是技术进步,更是油气行业发展理念的深刻变革。

参考文献

- [1]于佳,田真,王琛琛.科技赋能复杂油气藏绿色高效开发[N].中国石化报,2026-02-04(002).DOI:10.28130/n.cnki.ncshb.2026.000135.
- [2]孙同双.油田开发中后期高效采油工程技术研究[J].当代化工研究,2025,(19):130-132.
- [3]武永峰.中原油田采油厂实施数字化转型综合治理[J].现代班组,2025,(18):37-39.
- [4]冯建军.油田开发中后期的采油工程技术[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(14):181-183.