

# 基于全生命周期管理的油田地面土建工程 “技术 - 安全 - 成本”协同优化研究

余代明 (天津普丰建设集团有限公司, 天津 300280)

**摘要:** 油田地面土建工程在建设环境复杂性、运行周期长及设施更新频繁等特征驱动下, 其技术路径、安全要求与成本投入之间呈现出高度耦合与动态互动关系。本文提出基于全生命周期管理的油田地面土建工程“技术 - 安全 - 成本”协同优化建议, 将全生命周期视角引入油田地面土建工程管理, 可显著增强工程的结构可靠性、风险管控能力与经济性, 为油田基础设施高质量建设与长期稳定运行提供系统化支撑。

**关键词:** 油田地面土建工程; 全生命周期管理; 技术 - 安全 - 成本协同

中图分类号: TE48 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 036-0010-03

## Research on the “Technology-Safety-Cost” Collaborative Optimization of Oilfield Surface Civil Engineering Based on Whole Life Cycle Management

Yu Daiming (Tianjin Pufeng Construction Group Co., Ltd., Tianjin 300280, China)

**Abstract:** Driven by characteristics such as the complexity of the construction environment, long operational cycles, and frequent facility updates, the technical pathways, safety requirements, and cost investments in oilfield surface civil engineering exhibit a high degree of coupling and dynamic interaction. This paper proposes recommendations for the “technology-safety-cost” collaborative optimization of oilfield surface civil engineering based on whole life cycle management. Introducing a whole life cycle perspective into oilfield surface civil engineering management can significantly enhance the structural reliability, risk control capabilities, and economic efficiency of projects, providing systematic support for the high-quality construction and long-term stable operation of oilfield infrastructure.

**Keywords:** oilfield surface civil engineering; whole life cycle management; technology-safety-cost collaboration

油田地面土建工程是油气开发体系的重要组成部分, 其工程类型多样、运行场景复杂。随着油田开发不断进入深度稳定生产阶段, 既有设施面临老化加速与性能下降等问题, 新建及改扩建工程也呈现出更高的安全标准、更强的技术要求和更严的成本约束。在此背景下, 技术选择对安全水平的影响逐渐增大, 安全投入对全寿命成本的影响愈发突出, 成本结构又因长期运行维护需求而变得更加复杂, 使技术、安全与成本在工程全生命周期中形成不可分割的耦合体系。

### 1 油田地面土建工程的特点

油田地面土建工程具有专业性强、建设周期紧、环境条件复杂等显著特征。其建设对象包括站场、道路、管廊、储罐区及附属建筑等, 通常分布在偏远、地质条件多变的区域, 既要满足油气生产的技术要求, 又需兼顾安全生产和长期运行的可靠性<sup>[1]</sup>。工程类型多、单体规模差异大, 导致设计标准体系呈现多专业交叉的特点, 对结构稳定性、防腐蚀性能及沉降控制提出更高要求。与此同时, 油田建设往往面临跨区域施工、施工季节受限、材料运输距离长等现实约束, 使得进度组织、资源配置和质量管控难度显著上升。随着油田开发进入中后期, 老旧设施改扩建需求日益

增多, 既要满足现行规范要求, 又需与既有生产系统保持兼容, 这进一步提升了工程实施与运行维护的复杂性。

### 2 全生命周期各阶段关键协同点识别与分析

#### 2.1 决策 / 设计阶段

在决策与设计阶段, 技术、安全与成本之间的关联度最为紧密, 是影响工程全生命周期表现的起点。技术方案比选中, 不同结构体系、不同材料方案以及不同工艺路径会在耐久性、施工复杂度和后期维护频度上产生显著差异, 从而对安全风险水平和长期成本结构产生连锁作用<sup>[2]</sup>。安全设施“三同时”要求使安全要素在设计初期即参与到工程建模和空间布局之中, 从而形成与主体工程相互嵌套的结构关系。这种同步性使安全设施不再是附加项, 而成为影响管线布置、构筑物尺寸、站场间距等关键决策的重要变量。成本估算在此阶段不仅涉及建造费用, 也受到设计选型对未来运行周期的影响。例如, 耐腐蚀等级、结构冗余度和基础型式等因素在设计阶段即决定了后期维护成本和潜在停产损失。

#### 2.2 施工阶段

施工阶段的技术、安全与成本呈现动态交互的特

征, 各类因素在实际操作中高度敏感, 相互影响。新技术工艺在施工中的应用, 会对施工组织方式产生影响, 设备配置变化, 人员技能结构调整, 从而改变施工风险的暴露方式, 施工成本受到影响。例如, 工艺复杂度提升, 带来更高的精度要求, 标准化程度提高, 压缩作业风险窗口。施工安全风险在此阶段集中, 涉及多个环节, 风险水平随着施工工况变化发生实时变化, 现场环境出现波动。多种风险关联返工率, 导致工期延长, 加速资源消耗, 进而影响施工成本结构。成本超支的形成机制收到多种因素影响, 外部施工条件变化, 材料用量偏差, 工期发生波动, 其背后均与技术工艺的适配性因素密切相关, 影响现场安全。

### 2.3 运维阶段

运维阶段是工程生命周期中时间跨度最长的阶段, 本阶段信息丰富, 技术、安全与成本在此表现出累积效应, 呈现演化特性。技术改造由生产需求变化驱动, 设备结构老化, 新标准适用性出现变化, 实施范围受现有设施状态影响, 把控空间条件, 分析历史施工特点, 技术改造不仅是单项工程行为, 更是长期运行与早期设计之间的反馈关系。完整性管理体现为对设备长期状态的连续跟踪, 如构筑物、基础、管线及附属设施, 其核心在于识别设备的隐性变化。变化的发展具有时间相关性, 对外部环境极为敏感, 其演化路径直接影响运行安全水平, 也会影响未来维护投入。预防性维护成本的形成机制与完整性状态密切相关, 设施劣化速度决定维护周期与成本结构。

### 2.4 报废阶段

报废阶段呈现出与前期阶段不同的协同关系, 其核心不在于生产功能, 而在于环境影响与结构退役特性的互动, 呈现剩余价值<sup>[3]</sup>。绿色拆除技术的采用受制于设备附着状况, 分析结构类型, 把控材料组成, 总结历史改造记录, 分析不同设施在拆除过程中的产尘量, 衡量噪声水平, 构件分离难度差异较大, 直接影响拆除风险暴露方式, 选择合适的处置路径。安全环保处置的复杂性, 源于油田设施中可能存在的污染物, 油污残留、腐蚀产物、老化防腐层以及特殊废弃物, 其理化特性决定了处置等级, 所需环境防护措施有所差异。残值回收与材料成分、构件完整度以及腐蚀损伤程度密切相关, 其经济价值受材料性质与前期使用状况共同影响。

## 3. 基于全生命周期管理的油田地面土建工程“技术-安全-成本”互动关系

### 3.1 技术与安全的互动

在油田地面土建工程的全生命周期中, 技术与安全之间呈现双重互动特征。一方面, 技术进步带来本

质安全水平的提升<sup>[4]</sup>。例如, 高强度的结构材料, 精准的地基处理工艺, 智能的监测设备, 改变工程的安全边界条件, 提升结构稳定性与抗腐蚀性, 强化变形控制能力, 从而降低事故发生的概率。技术改进减少人员暴露在危险环境中的时间, 使许多传统高危环节, 转变为可控性更高的自动化操作。另一方面, 新技术本身可能引入新的不确定性, 施工工艺发生变化, 设备复杂度提升, 新材料性能尚未完全验证, 在此情况下, 新技术可能带来新的失效模式, 增加调试风险, 导致适应性偏差。例如, 设备自动化程度越高, 对系统稳定性的依赖越强, 接口匹配性要求更高, 一旦失败, 其影响范围更大。因此, 技术与安全之间的关系不是单向的, 而是提升本质安全与引入潜在风险之间的双向张力, 其平衡依赖于技术成熟度, 严格把控应用场景条件, 控制工程全生命周期的耦合结构。

### 3.2 技术与成本的互动

技术选择对成本结构的影响贯穿油田地面土建工程的全生命周期, 其互动表现出明显的阶段性差异。前期采用技术含量更高的方案往往意味着更高的建设投资, 例如高耐久性材料、精细化施工工艺或信息化监测系统都会提高直接建造成本。然而, 这类技术通常能够改善结构服役性能, 延缓劣化进程, 减少运行期的维修工作量、停产次数和设备更换需求, 从而在生命周期后段表现为维护成本降低、运营效率提升等收益。而技术投入偏低虽可降低初建成本, 但其长期运维成本往往呈增长趋势, 尤其在腐蚀环境、地质变化或强度要求较高的场景中, 结构维护频率和修复难度都会显著增加。此外, 技术选择还可能影响事故发生概率及故障恢复时间, 从而对间接成本产生深远影响。由此可见, 技术与成本之间的互动并非线性, 而是由前期投入、后期收益、环境条件与设施功能要求共同塑造的多维关系, 其核心特征表现为前期投入结构对后期成本分布的长期影响。

### 3.3 安全与成本的互动

安全与成本的互动体现为短期投入与长期代价之间的权衡, 其机制在油田地面土建工程中尤为鲜明。安全相关要素包括结构冗余度、防火防爆设施、监测系统、工艺隔离措施等, 在建设期表现为直接且量化的成本支出。由于这些投入并不直接创造生产收益, 通常被视为短期成本增加的主要来源。然而, 从生命周期视角看, 安全投入与事故成本之间存在显著的非对称关系。一次结构失效、火灾爆炸、重大泄漏或地面沉陷, 不仅可能带来修复费用, 还会导致停产损失、环境赔偿、设备报废甚至长期信誉影响, 其综合成本通常远高于初期安全投入。同时, 安全不足可能导致

设施老化速度加快、风险积累扩大,使后期维护呈现出链式增长趋势。因此,安全与成本之间的互动不是简单的“投入与节约”关系,而是事故风险概率、事故损失规模、运行环境条件及设施耐久性共同作用下的动态演化过程,其本质是一种短期显性成本与长期隐性成本之间的博弈结构。

#### 4 基于全生命周期管理的油田地面土建工程“技术-安全-成本”协同优化建议

##### 4.1 以技术选型驱动安全与成本效益

在油田地面土建工程的全生命周期中,技术选型是影响安全水平与成本结构的主导因素,作为协同优化的核心抓手<sup>[5]</sup>。技术方案确定不仅以建设成本为判断依据,而是从多个维度综合考量,关注材料性能,分析结构耐久性,衡量施工适应性,明确后期维护需求,使技术本身成为提升本质安全的关键路径,降低全周期投入。

例如,在腐蚀、沉降、冻融等复杂环境中,优先选择耐久性更高的结构体系,选择适配性更好的材料,在提升基础安全裕度的同时,减少运行期高频维修,在长期成本中形成明显优势。将技术成熟度、工程应用经验和技术的可复制性,纳入选型评估,加强对新技术的风险识别验证,使技术方案提升工程质量,强化运行可靠性,在此基础上,兼具经济可行性。技术选型前置优化,提升安全性,降低运维压力,优化成本结构,展现多重效益,为全生命周期的系统性协同奠定基础。

##### 4.2 将安全管理融入技术与成本决策

安全管理在油田地面土建工程中具有基础性地位,应贯穿技术决策与成本决策全过程,而非作为工程实施后的附加环节。建议在规划、设计、施工、运维等阶段建立安全要素与技术参数、材料选型、结构形式之间的耦合分析机制,使安全需求能够以量化形式进入技术与成本决策体系。例如,在技术路径选择时同步评估其对安全隔离、防腐蚀能力、结构稳定性以及人员暴露风险的影响,使安全需求在技术模型中得到具体体现。在成本评估中,应将潜在事故概率、结构失效风险以及停产带来的间接损失纳入经济测算,使成本决策不再局限于建造费用,而是体现对全周期安全风险的综合权衡。

同时,通过建立跨专业协同评价机制,使安全管理人员、设计工程师和成本工程师在同一决策平台下共享信息、共同判断,避免技术优选、安全要求与成本目标之间的脱节。将安全管理前置嵌入技术与成本体系,形成决策一体化逻辑,实现工程本质安全水平与全周期经济性的统一。

##### 4.3 以全生命周期成本最优统领技术与安全决策

在面对建设投入、运营风险与长期维护压力的多重约束时,全生命周期成本(LCC)应成为统领技术与安全决策的核心原则<sup>[6]</sup>。以全生命周期成本为依据,可促使技术选型不再停留于初建成本比较,而是转向对运行期可靠性、维护周期、故障风险、停产损失以及报废成本的综合判断,使决策逻辑由短期经济性向长期收益最大化转变。在技术决策层面,通过LCC可识别不同材料、结构形式和工艺路线在使用寿命与维护成本上的差异,从而促使工程在初期即选择能在全周期形成综合优势的方案。

在安全管理层面,LCC能够量化安全设施投入与事故损失之间的关系,将安全投入纳入成本优化框架,使安全决策由经验判断转向成本-风险-收益的系统分析。以LCC为统领,还能够推动建设期与运维期之间的信息贯通,使前期设计更贴合后期维护场景,使施工质量直接影响长期成本表现,从而形成全周期联动的价值链结构。

#### 5 结语

综上所述,油田地面土建工程的复杂性和长期性决定了其管理模式必须突破传统阶段化、碎片化的范式,转向全过程、全要素的系统化思维。引入全生命周期管理理念,清晰识别技术、安全与成本在不同阶段的耦合逻辑,揭示其互动关系的动态演化特征。本研究围绕决策设计、施工、运维及报废阶段展开分析,厘清技术进步、风险变化与成本结构之间的内在联系,并在此基础上提出协同优化的建议体系。技术选型的前置优化、安全管理的前置融入以及全生命周期成本的统领作用,是实现工程系统性提升的关键路径。

#### 参考文献:

- [1] 黄宇洁. 油田地面工程建设施工中存在的问题分析及整改措施研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(19): 94-96.
- [2] 杨鹏飞, 贺焱, 张婧. 油田地面建设安全环保管理体系的构建与优化[J]. 中国管理信息化, 2025, 28(19): 221-223.
- [3] 孔维龙. 油田地面工程施工质量监管策略研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(17): 37-39.
- [4] 栾晓堃. 数字化设计在油田地面工程中的应用研究[J]. 石化技术, 2025, 32(09): 74-76.
- [5] 李晗. 油田地面规划设计中土建工程的抗震加固技术应用与实践[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(16): 146-148.
- [6] 包铁龙, 何冬强. 油田地面工程施工的质量监督管理[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(08): 201-203.