

面向精益建设的石油化工工程全过程成本控制研究

李梓沫 (中石化南京工程有限公司, 江苏 南京 210046)

摘要: 本文围绕石油化工工程全过程成本控制展开研究, 分析了投资、设计、采购、施工及运行阶段成本构成与管理需求, 提出基于精益建设理念的控制方法, 包括投资经济性评估、设计阶段BIM优化、采购供应链管理、施工资源优化及动态成本监测, 并结合数字孪生与信息化平台实现实时数据分析与精益改进, 形成闭环管理机制, 提升材料利用率、工时效率及工程经济性, 实现全过程成本精细化管控。

关键词: 石油化工工程; 全过程成本控制; 精益建设; BIM; 数字孪生

中图分类号: F407 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 007-0049-03

Research on Whole-Process Cost Control of Petrochemical Projects under Lean Construction

Li Zimu (Sinopec Nanjing Engineering Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 210046, China)

Abstract: This paper studies whole-process cost control in petrochemical projects. It analyzes cost composition and management needs in investment, design, procurement, construction, and operation stages. A lean construction approach is proposed, including economic evaluation of investment, BIM-based design optimization, supply chain management in procurement, construction resource optimization, and dynamic cost monitoring. Combined with digital twin and information platforms, real-time data analysis and lean improvement are achieved, forming a closed-loop management system that improves material use, labor efficiency, and project economy.

Keywords: Petrochemical projects; Whole-process cost control; Lean construction; BIM; Digital twin

石油化工工程资金投入大、系统结构复杂、建设周期久, 传统成本管理主要聚焦事后核算, 容易碰到设计和施工脱节、调整次数过多、材料浪费严重、返工现象普遍及全流程数据不打通等问题, 引发投资失控、效益偏低, 行业提质增效升级、推行精益建设转型的大背景下, 推进全生命周期、精细化、动态化成本管控已是必然走向。当前多数项目存在前期管控松散、动态监测缺失、BIM与数字孪生等技术应用不扎实等短板, 本文紧扣精益建设核心, 搭建覆盖投资、设计、采购、施工、运维的全链条成本管控体系, 探究精益化管控方法和信息化实现路径, 能有效助力提高资源利用效率、压缩项目全生命周期成本、促进石化工程提质增效。

1 石油化工工程成本构成与精益建设需求分析

1.1 石油化工工程成本构成

石油化工工程成本主要含投资成本、施工成本、设备采购成本、材料费用、劳务费及运行维护成本, 其中, 设备采购占总成本的45%~55%左右, 似一座年处理能力为200万t/a的乙烯装置, 其大型反应釜、塔器及泵阀设备投资约2.3亿元, 总投资4亿5000万元的51%; 土建和安装施工成本大概占总成本的30%~35%, 主要涵盖土建结构、管道装置、仪表电气及安全设施, 施工单位每日人工成本大概在2000~2500元每人每天; 工程管理和设计成本

占总投资的10%~15%, 当中设计院人力成本大概是800~1200元每日每人。

材料消耗方面, 钢材用量大概是每吨乙烯产能0.8t, 高性能管线要用316L不锈钢, 成本大概每吨2.5万元, 这个成本构成繁杂, 阶段零散, 易产生管理盲区, 给精益建设提挑战。

1.2 工程全过程成本控制需求

石油化工工程全程成本控制要涵盖投资决策、设计优化、采购管理、施工控制及运行维护五个阶段, 实现“早规划、精设计、控成本、提效率”的闭环管理, 在投资决策阶段, 要建项目经济性分析模型, 如净现值(NPV)、内部收益率(IRR)及投资回收期(PBP), 把不同工艺路线和装置规模做比较; 设计阶段要借助工艺模拟(Aspen Plus、HYSYS)优化设备尺寸和管道布置, 减少材料浪费; 采购和供应链需用电子招标、供应商绩效评核及合同单价锁定, 降低价格波动风险; 施工阶段借助项目进度管理(CPM/PERT)、班组考核及精细化材料管理, 降低浪费; 调试和运行阶段要经设备可靠性分析(MTBF、MTTR)及能耗监测, 实现运行成本最优^[1]。

2 面向精益建设的全过程成本控制方法

2.1 投资决策阶段成本控制方法

在投资决策阶段, 精益建设需借助系统化、量化办法开展成本管控。首先, 要建多方案经济性比较模

型,结合净现值、内部收益率及动态现金流模拟,给不同装置规模、工艺路线及投资组合做定量评估。操作上,借助构建原材料、设备及施工费用清单(BOM),精确算出单元设备投资额、单位产能投资(万元/t原料),且引入敏感性分析,对原油价格波动正负10%、建设周期延长 ± 6 个月等因素做模拟,生成投资风险矩阵,给决策提供科学根据。

其次,要在模型中细化分项成本和资源消耗,构建成本动态调整机制,把工程量清单分到设备单元、管道段及土建结构,结合单位市场价格、人工单价及工期信息,实现投资阶段精细预算把控,用定期复盘和迭代优化办法,每个方案都要算现金流月度分布、折现系数还有风险系数,把各方案投资回收期及资金占用情况做对比分析,进而在面对精益建设的要求时,保证投资决策时期预算透明、能控且可优化。

2.2 设计阶段成本控制方法

设计阶段对石油化工工程施工成本有决定性作用,一般决定项目总投资大概70%左右。然而,当下多数项目在设计阶段有成本控制意识欠缺、设计和施工脱钩、变更频繁这类问题,致使施工阶段成本被动增多。例如,某化工装置刚开始设计阶段没充分顾及管道安装空间和设备维护半径,后期施工中多次改动布置图,增加了大概8%的材料和人工成本^[2]。

针对这些问题,设计阶段要强化成本导向设计观念,把“施工可实施性”归入设计考核指标中,构建以造价管控作核心的设计评审机制。设计单位要和施工单位预先协同,用BIM三维模型做碰撞检查、施工模拟以及可维护性分析,将土建、设备、管道、电气设计做动态协调,减少返工和浪费,实现设计阶段的精益化预控。

具体实施中,要创建“设计阶段成本数据库”,把类似装置结构方案、材料清单(MTO)和单位造价关联起来,生成量化的参考指标,如反应装置钢结构造价控制在每吨1.6万元以内,工艺管道单位长度造价控制在每米1200元上下。

设计阶段得借助价值工程(VE)与全生命周期成本(LCC)分析,比较方案经济性,挑选投资效益最高的设计方案,对于关键工艺装置和高成本物料,设计阶段要借标准化、模块化设计去降低现场施工难度,缩短安装周期,若用模块化管廊设计,施工安装人工量能减10%~12%。

此外,搭建设计变更经济评审制度,每次变更要经过成本影响评估并形成审批闭环,保证设计调整不致使施工阶段成本失控,从源头保证项目造佳能控、施工顺利、成本最佳。

2.3 施工资源优化与作业流程成本管控

在施工阶段,资源优化首先需对人、机、料进行精细化管理。施工前,应建立班组人员与施工工序的对应表,将每个班组每日可投入人数、技能等级及作业工时量化,例如管道安装班组每日投入8~10人,每人每日工时8h,焊接工序需高级焊工占比至少30%。

机械设备方面,要建立设备台账,明确吊装机、焊机及施工车辆的台班成本、工作效率和维护周期,按施工节点分配机械资源,确保关键路径工序设备占用率不低于85%,闲置率控制在15%以内。

材料管理上,应采用条码或RFID追踪管线、钢结构及阀件消耗量,将材料按工序、施工段和安装顺序分批配送,避免材料堆积或错配,管材切割剩余材料率严格控制在5%以内,并设置动态库存上限和安全库存系数,对高价值材料如316L不锈钢管,每批采购量与施工用量保持 $\pm 3\%$ 精度。

作业流程管控重点在施工工序优化和节拍管理。采用CPM/PERT关键路径方法,将施工任务拆解到日工作计划,每个工序明确起止时间与责任班组,例如反应釜安装阶段需连续3天完成吊装、固定和支撑,施工间隔不得超过2h,以保证工序衔接顺畅^[3]。借助4D BIM模拟施工,提前优化吊装顺序、管道安装路径及临时支撑布置,施工通道占用面积控制在总场地的25%以内。

施工日志、工时记录和材料消耗实时上传至信息化平台,建立工序、班组与成本关联数据库,每日核对人工、机械与材料使用情况,若某工序偏离标准资源量超过 $\pm 5\%$,即时调整调配方案。

2.4 施工阶段成本控制方法

施工阶段是石油化工工程成本耗费的关键阶段,精益建设着重工序优化、资源最佳配置及精细化管理。首先,施工前要建立详细进度管理体系,将CPM/PERT关键路径分析和施工计划结合起来,将工序、班组还有日工作量做精确拆分,保证关键路径工期误差控制在 ± 3 天之内。

借助4D BIM和虚拟施工模拟,对施工现场材料配送路线、吊装顺序、机械设备布置、施工通道及临时堆放空间做优化演练,施工方案中要写明吊装机台班安排、施工顺序及材料供应窗口,降低施工现场临时占用面积约30%,避免重复建设及资源遭浪费,还为班组给予可视化施工指导,提高操作效率。

其次,要推行班组绩效考核和材料管理闭环,实现施工过程精益化管控,借着实时监测劳动效率、机械设备利用率及施工进度,记录并分析施工工序、工时消耗及资源使用状况,钢材切割剩余材料比率要控

制在 5%，管道焊接返工比例低于 2%，借助施工现场成本数据库，对材料、人工及机械资源予以动态监控，把偏差超出 $\pm 5\%$ 的环节立即调整。

将 BIM 模型和信息化系统结合起来，能对施工方案、工序次序及材料调配做迭代优化，构建施工阶段闭环管理机制。在精益建设理念指引下，施工管理不光留意成本控制，更注重资源利用最优化、工序衔接顺畅及施工安全，保证整个施工过程经济和效率最大程度提升。

2.5 施工阶段动态成本监测与偏差控制

施工阶段动态成本监测需建立全流程数据采集体系，将人工、材料、机械及外包服务等各类成本实时记录。具体操作中，施工班组每日需上传工时记录、作业工序完成情况及材料消耗数据，例如焊接班组每日焊接管段长度、消耗焊条数量及辅助材料量，钢结构安装班组每日完成安装件数及吊装机械台班数据。

机械设备台账中每台吊装机、挖掘机及焊机均设置每日台班成本与维护消耗记录，施工材料采用条码或 RFID 管理，跟踪入库、领用及剩余量，确保管材切割剩余率控制在 5%，高值阀件和不锈钢管采购批次与施工消耗精度控制在 $\pm 3\%$ ^[4]。这些数据通过移动终端或施工信息化系统实时上传至云端平台，为偏差分析提供基础数据。

偏差控制以实时监测和异常预警为核心。平台每日汇总各班组、工序及材料的成本数据，与预算基准及标准工序资源消耗量对比，计算偏差率，例如人工成本偏差 $\pm 5\%$ 、材料消耗偏差 $\pm 3\%$ 作为预警阈值。对偏差超标的工序，系统自动生成整改指令，包括调整班组人数、优化施工顺序或重新分配材料供应窗口。

关键施工节点如大型反应釜吊装或塔器安装，需每日对成本占用、机械台班和人工投入进行跟踪，偏差率一旦超过设定阈值，立即通知施工管理人员调整调度方案。同时，将动态监测数据与 BIM 模型结合，可对施工工序、材料使用和机械调配进行迭代优化，形成施工阶段闭环成本管理，实现对工序、资源和预算偏差的全方位控制。

3 全过程成本控制信息化与数据化管理

3.1 成本管理信息化平台建设

全过程成本控制离不开信息化平台支持，平台要有投资、设计、采购、施工和运行阶段成本数据采集、剖析、预估及决策的功能，具体实施涵盖：构建基于云架构的成本管理系统，支持多用户、多权限、实时数据去更新；引进电子 BOM、施工日志和设备运行数据，实现全流程数据收集；系统内有经济性分析、预算偏差分析及动态成本预测模块，能实现成本偏差预

警，偏差超 5% 自动触发整改流程；借助移动端和 PC 端同步，能实现施工现场和管理中心信息实时共享，提升成本管控响应速度超五成。

3.2 BIM 和数字孪生在全过程成本控制中的应用

BIM 和数字孪生技术是精益建设重要技术支撑，BIM 能实现设计、施工及运维的三维可视化、碰撞检查与施工模拟，提升材料利用率大概 10%；数字孪生能在调试和运行阶段借实时数据反馈开展虚拟运行仿真，预测能耗、设备状态和维护需求，单位产品运行成本降了约 4%~6%；借助 BIM 和数字孪生结合，能实现工序优化、进度模拟及资源调度优化，施工工期能缩短 10~12%，成本管控愈发精细且动态化^[5]。

3.3 数据分析与精益改进

全过程成本控制数据分析主要含历史成本分析、偏差分析及预测分析，具体做法：搭建历史成本数据库，统计分析类似装置的设备、材料和施工成本，形成基准成本；借助数据挖掘技术辨认成本异常之处，施工阶段材料浪费超 5% 时自动生成优化提议；把能耗监测数据、生产数据及设备故障数据结合起来，做回归分析和优化建模，实现精益改进；定时开展 PDCA 循环评定，把优化建议用到下一项目建设中，成本节约率能持续提升大概 2%~3%。

4 结语

本文基于精益建设理念，系统研究了石油化工工程全过程成本控制方法，覆盖投资决策、设计优化、采购管理、施工精益化及运行维护阶段。通过构建多方案经济性分析模型、设计阶段 BIM 与价值工程优化、施工阶段资源与工序精细化管理，以及动态成本监测与偏差控制体系，实现了全过程成本数据化、信息化和闭环管控。研究表明，借助数字孪生与信息化平台，能够实现成本分项透明化、工序资源优化及施工动态调控，为石油化工工程提供科学的精益化成本管理方法和技术支撑。

参考文献：

- [1] 王东方. 石油化工工程“数字化”研究[J]. 化工设计通讯, 2022, 48(01): 21-23.
- [2] 鹿学文. 浅谈石油化工 EPC 总承包项目全过程造价管理[J]. 天津化工, 2023, 37(04): 129-132.
- [3] 董凯斌. 石油化工项目工程造价全过程管理[J]. 河南建材, 2022(11): 143-145.
- [4] 范宗海. 大型石油(煤)化工工程自动化和信息化集成系统与企业精益管理[J]. 石油化工自动化, 2015, 51(04): 1-6.
- [5] 梅佳佳. 低碳经济背景下石油化工企业碳成本管理优化路径研究[J]. 品牌研究, 2024(06): 44-46.