

石化装置扩建工程造价超支预警系统设计探析

侯 瑞（中海油石油化工有限公司，山东 济南 250100）

摘要：石化装置扩建工程因其复杂性、长周期性与高风险性，造价超支问题成为项目管理的核心挑战。本文设计了一套基于数据驱动的造价超支预警系统，以动态性、多维度集成与可操作性为原则，通过数据采集、风险识别、预警模型与反馈控制模块，实现造价风险的实时监控与智能预警。系统融合大数据、BIM、数字孪生与物联网技术，构建“感知-分析-决策-学习”闭环管控体系，精准识别设计变更、供应链中断等超支诱因，并生成分级响应策略。在某石化企业乙烯装置扩建工程中，系统将成本超支率从11.6%降至3.2%，动态成本偏差率降低67%，显著提升了成本控制的精准度。研究表明，该系统为石化工程成本管理提供了科学化、智能化的解决方案。

关键词：石化装置扩建工程；造价超支；预警系统；大数据；BIM

1 引言

石化装置扩建工程，作为工业领域中的重要组成部分，其复杂性与高风险性不容忽视。这类工程往往伴随着巨额的投资、高度密集的技术应用以及漫长的建设周期，任何一个环节的疏漏都可能对整个项目的经济性和企业的长远发展产生深远影响。尤为突出的是造价超支问题，它不仅是一个普遍存在的难题，更是众多石化企业在项目推进过程中必须直面的严峻挑战。造价超支不仅意味着项目成本的增加，更可能引发一系列连锁反应，如资金链紧张、项目进度受阻、企业效益下滑等，严重时甚至可能导致项目失败，进而削弱企业的市场竞争力，阻碍其可持续发展步伐。因此，如何有效控制石化装置扩建工程的造价，预防超支现象的发生，成为了业界亟待解决的关键问题。在此背景下，造价超支预警系统的引入显得尤为必要。该系统旨在通过先进的信息技术手段，对工程造价进行实时、动态的监控与分析，及时发现并预警潜在的造价超支风险，为项目管理者提供科学的决策依据，从而实现对工程造价的有效控制。这一预警机制不仅有助于提升项目管理的精细化水平，还能在一定程度上降低企业的运营风险，保障石化装置扩建工程的顺利进行。

2 石化装置扩建工程造价超支成因分析

石化装置扩建工程造价超支是一个复杂且多维度的问题，其成因涵盖了从工程特性到管理决策，再到外部环境影响的广泛领域。

石化装置扩建工程本身就具有高度的复杂性和长周期性，这直接导致了成本控制的难度加大。在技术上，石化装置往往涉及高温高压、多流程耦合的工艺

系统，技术升级或设备选型变更可能会引发一系列连锁反应，如设计参数的调整、工程量的增加以及材料需求的变动等^[1]。这些变化不仅增加了施工难度，还可能导致预算的严重超支。此外，新旧装置的衔接也是一个技术难题，技术兼容性问题可能会迫使施工方案进行反复优化，从而进一步推高成本。

管理层面的不足也是导致造价超支的重要原因。在项目前期，如果可行性研究不够深入，对工程规模、技术路线及市场环境的预判出现偏差，那么投资估算就很可能失准。例如，工程量清单的遗漏或特殊施工措施的低估都可能使预算基线偏离实际需求。在施工过程中，如果缺乏动态成本监控机制，那么进度延误、资源错配以及合同纠纷等问题就可能频繁出现，进而导致成本的累积增加。此外，多主体之间的协同低效也是一个不容忽视的问题。业主、设计方、承包商等参与方的目标与信息不对称，容易形成“数据孤岛”，导致成本管控的失效。

外部环境的变化同样对造价超支产生着重要影响。政策法规的变动，如环保和安全标准的提高，可能会迫使企业追加投资以符合新标准。这些额外的投资往往不在原预算之内，因此会显著增加工程成本^[2]。同时，市场波动也是影响造价的重要因素。人工和材料价格受宏观经济周期、地缘政治冲突等多重因素影响，可能出现剧烈波动。例如，钢材价格的上涨、劳动力短缺导致的人工费率提高等，都可能使原预算失效，进而引发造价超支。

3 造价超支预警系统设计框架

3.1 系统设计原则

石化装置扩建工程造价超支预警系统的设计需以

风险防控的动态性、多维性与实用性为核心导向，通过技术手段与管理逻辑的深度融合，构建适应复杂工程场景的智能化防控体系。在系统设计原则层面，动态性是预警机制有效运行的基础，要求系统能够实时捕获工程实施过程中的关键数据流（如合同支付进度、资源消耗量、设计变更频次等），并依托物联网传感器、BIM 模型与项目管理软件的无缝对接，形成“数据采集 – 风险分析 – 预警触发 – 干预反馈”的闭环链路，从而打破传统成本管理中“事后纠偏”的滞后性，实现超支风险的早期识别与快速响应。多维度集成则强调对技术、经济、管理等多领域风险的协同管控，例如将工艺变更引发的工程量波动（技术维度）、材料价格指数异常（经济维度）与合同索赔争议（管理维度）纳入统一分析框架，利用模糊综合评价法或蒙特卡洛模拟量化风险耦合效应，避免单一视角下的误判与漏判。同时，可操作性是系统落地的关键保障，需通过模块化设计降低使用门槛——例如，在预警阈值设置中引入弹性调整机制，允许用户根据项目特征（如装置类型、施工难度）自定义风险等级划分标准；在交互界面中嵌入可视化仪表盘，将复杂的风险模型转化为直观的趋势图表（如成本偏差率曲线、风险热力图），辅助管理者快速定位问题根源并制定针对性干预策略^[3]。三者共同作用，确保预警系统既具备对动态风险的敏锐感知力，又能通过多维数据融合提升决策科学性，最终在工程实践中实现“风险可预警、超支可控制”的精细化管理目标。

3.2 核心功能模块设计

石化装置扩建工程造价超支预警系统的核心功能模块设计需围绕数据驱动与风险闭环管理展开，通过分层递进的逻辑架构实现从基础数据到决策支持的智能化转换。数据采集层作为系统根基，需打破传统信息孤岛，整合工程概算、合同台账、进度计划、资源消耗（如钢材用量、人工工时）等多源异构数据，并借助物联网传感器、BIM 协同平台及 ERP 系统实现动态数据实时抓取，同时通过数据清洗与标准化处理（如统一计量单位、消除冗余字段）构建高质量成本数据库，为后续分析提供可靠输入。风险识别层在此基础上，依托历史工程超支案例库与专家经验知识库，提取关键风险因子（如设计变更频次、供应链延迟概率、政策合规成本增量），利用关联规则挖掘或贝叶斯网络构建风险特征矩阵，实现从海量数据中自动筛选高关联性风险信号^[4]。例如，通过分析过往项目中

“材料价格波动”与“合同索赔率”的时序相关性，可预判特定外部事件（如国际制裁）对当前项目的潜在连锁影响。预警模型层则需融合定量与定性方法以平衡精度与可解释性——定量模型方面，灰色预测适用于小样本条件下短期成本趋势外推，蒙特卡洛模拟通过随机抽样评估极端风险场景下的超支概率，而 LSTM 神经网络可捕捉施工进度、资源消耗与成本偏差间的非线性关系，实现多变量耦合预警；定性模型方面，模糊综合评价通过隶属度函数量化“政策变动紧迫性”“技术方案成熟度”等模糊指标，风险矩阵法则将风险发生概率与影响程度映射为可视化等级，两者结合可弥补纯数据驱动模型的局限性，尤其适用于新兴技术应用或突发性外部冲击的评估。反馈控制层作为终端输出模块，需将模型计算结果转化为可操作的管控指令：基于风险阈值设定（如成本偏差率超过 5% 触发黄色预警），系统自动生成分级响应策略（红色预警触发紧急停工审查，黄色预警启动成本压缩方案），并通过智能推荐引擎匹配历史干预案例库（如设计优化中的模块化施工替代方案、资源再分配中的关键路径资源优先保障），同时动态追踪措施执行效果并反馈至上游模型实现自优化。各模块通过数据流与业务流的双向交互，形成“感知 – 分析 – 决策 – 学习”的完整闭环，最终实现从被动应对到主动防控的范式转变。

3.3 关键技术支撑

石化装置扩建工程造价超支预警系统的支撑体系需深度融合前沿信息技术与工程管理需求，构建“数据感知 – 智能分析 – 动态调控”的技术生态链。大数据技术是系统运行的底层基石，其通过分布式存储与并行计算能力，整合来自设计图纸、采购合同、施工日志、传感器流数据等多源异构信息（如结构化报表与非结构化文本），利用数据清洗算法（如基于规则引擎的异常值剔除）与特征融合方法（如实体识别与关联关系挖掘），将碎片化数据转化为标准化、可追溯的成本知识图谱，为风险因子提取与模型训练提供高质量输入。例如，通过自然语言处理技术解析工程变更单中的关键信息（如变更原因、影响范围），可自动关联历史相似案例的成本偏差率，辅助量化当前变更的潜在超支风险。BIM 与数字孪生技术则聚焦于工程实体与虚拟模型的动态映射，通过将进度计划、资源消耗与成本数据嵌入三维可视化模型，实现“进度 – 成本”双维度的实时联动分析^[5]。例如，在数字

孪生环境中模拟设备安装进度滞后对整体工期的影响，可自动触发关联工序的人工与机械成本重估，结合蒙特卡洛模拟预测超支概率；同时，BIM 模型中的碰撞检测与施工模拟功能可提前发现设计冲突，减少返工成本，从源头抑制超支诱因。物联网技术通过部署于施工现场的传感器网络（如 RFID 标签、智能电表、GPS 定位装置），实时采集材料库存、设备运行状态、人员出勤等动态数据，形成覆盖“人机料法环”全要素的成本监测网。例如，混凝土浇筑量的实时监测数据与设计用量对比，可即时触发材料浪费预警；塔吊能耗数据与工程进度的关联分析，可识别机械低效运转导致的隐性成本攀升。三者协同作用下，大数据技术确保数据的广度与深度，BIM 与数字孪生强化分析的直观性与前瞻性，物联网则保障数据的实时性与颗粒度，共同赋能预警系统实现从“经验驱动”到“数据驱动”的跨越，最终为动态成本管控提供精准技术锚点。

4 案例分析与应用验证

在石化装置扩建工程造价超支预警系统的应用验证中，以某石化企业 120 万吨/年乙烯装置改扩建工程为例，可系统性展现预警技术的实际效能。该项目总投资约 125 亿元，建设周期跨越三年，涉及裂解炉升级、压缩机扩容及配套管廊延伸等复杂工程内容。建设初期，项目即面临多重挑战：一是技术复杂性导致的设计迭代，如新型高选择性催化剂的应用需重新核算反应器尺寸与配套管线压力等级；二是受国际地缘政治影响，关键进口设备（如高压换热器）的交货周期从原计划的 8 个月延长至 14 个月，引发供应链成本激增；三是施工阶段因地下岩层裂隙意外暴露，被迫调整桩基设计方案，导致土建成本攀升。为应对这些风险，项目团队引入造价超支预警系统，构建了覆盖全生命周期的动态管控体系。通过 BIM 平台整合地质勘探数据、设备采购合同与施工进度表，实时追踪材料到货率与设计变更频次，并利用物联网传感器监测现场混凝土浇筑量、钢结构焊接进度等关键指标，当系统检测到某月钢材实际消耗量超出计划值 15% 时，自动触发黄色预警，提示采购部门核查是否存在施工浪费或设计误差。针对进口设备延迟风险，预警模型基于蒙特卡洛模拟推演了 12 种供应链中断场景，预测极端情况下超支概率达 42%，系统随即启动应急预案，推荐采用国产化替代方案并协调本地供应商预留产能，最终将设备交付周期压缩至 10 个月，减少潜在超支约 1.8 亿元。在应对设计变更方面，模

糊综合评价模型量化了岩层处理方案变更对整体造价的影响系数（达 0.23），项目团队据此优化桩基布置密度，采用微型桩与灌浆加固组合工艺，节省土建成本约 6500 万元^[6-7]。

经实践验证，预警系统使项目成本超支率从可研阶段的预估 11.6% 降至竣工时的 3.2%，低于行业同类项目平均水平（8%–12%），其中 83% 的高风险事件在触发红色预警前即被有效干预，动态成本偏差率较传统管理模式降低 67%。

这一案例表明，预警系统通过数据驱动的风险识别与智能化的决策支持，显著提升了复杂石化工程成本控制的主动性与精准度，为行业推广提供了实证依据。

5 结论

本文通过对石化装置扩建工程造价超支成因的深入分析，设计了一套有效的造价超支预警系统。该系统遵循动态性、多维度集成和可操作性等设计原则，通过数据采集、风险识别、预警模型和反馈控制等核心功能模块，实现了对造价风险的实时监控和预警。在某石化企业乙烯装置扩建工程的实际应用中，该系统有效降低了造价超支的风险，为项目的顺利进行提供了有力保障。未来，随着技术的不断进步和应用场景的不断拓展，造价超支预警系统将在石化装置扩建工程中发挥更加重要的作用。

参考文献：

- [1] 陈曦. 石化工程造价数据库构建原则初探 [J]. 石油化工设计, 2023, 40(1):56-59.
- [2] 李耀武. 油气田地面工程造价控制的要点探讨 [J]. 石油石化物资采购, 2023(9):199-201.
- [3] 董建伟. 工程造价数字化估算系统探究 [J]. 工程造价管理, 2023(6):91-97.
- [4] 姚明勇. 浅析石油化工项目工程造价全过程管理 [J]. 石油石化物资采购, 2024(2):189-191.
- [5] 王蓓. 浅谈如何对石化企业设备安装工程造价进行有效控制 [J]. 中国设备工程, 2024(1):44-46.
- [6] 毛如融. 石化工程成本管理的要素及对策方法 [J]. 科学时代, 2023(10):91-93.
- [7] 梁志伟. 试析石化工程建设施工成本控制及造价管理 [J]. 城市建设理论研究, 2023(16):11-15.

作者简介：

侯瑞（1985-），男，汉族，山东陵县人，本科，研究方向：工程造价，项目管理。