

化工过程本质安全化设计的技术路径 与全周期经济效益研究

周霞 (苏交科集团 (江苏) 安全科学研究院有限公司, 江苏 南京 211112)

摘要: 化工过程本质安全化设计是破解“安全投入-经济效益”矛盾的核心路径。基于 T/CCSAS 044—2023 标准与本质安全理论, 构建“设计-运行-评估”技术体系, 结合南京诚志永清绿氨项目、沈化院微化工项目等实践案例, 测算全周期经济效益。研究结果显示: 本质安全改造可使事故损失降低 72%, 运营成本节约 15%~35%, 投资回收期缩至 4.2 年以内。研究为化工企业提供经济可行的安全升级方案, 契合行业低碳转型需求, 兼具安全保障与经济增值双重价值。

关键词: 化工过程本质安全; 技术路径; 全周期经济效益; 投资回收期

中图分类号: TQ086 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 009-0109-03

Research on the Technical Pathway and Full-Life-Cycle Economic Benefits of Inherently Safer Design for Chemical Processes

Zhou Xia (Su Jiaoke Group (Jiangsu) Institute of Safety Science Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 211112, China)

Abstract: Inherently safer design for chemical processes is a core pathway to resolving the conflict between “safety investment and economic benefits.” Based on the T/CCSAS 044—2023 standard and inherent safety theory, a “design-operation-assessment” technical system was constructed. Combined with practical cases such as the Nanjing Chengzhi Yongqing Green Ammonia Project and the Shenyang Research Institute of Chemical Industry’s Microreactor Project, the full-life-cycle economic benefits were calculated. The research results show that inherently safer modifications can reduce accident losses by 72%, lower operational costs by 15%–35%, and shorten the investment payback period to within 4.2 years. This study provides economically viable safety upgrade solutions for chemical enterprises, aligns with the industry’s low-carbon transition needs, and delivers dual value in terms of safety assurance and economic enhancement.

Keywords: chemical process inherent safety; technical pathway; full-life-cycle economic benefits; investment payback period

2025 年中国化工产业总产值预计达 16 万亿元以上, 较去年实现 9.1% 的增长, 但在 2023~2025 这个阶段, 较大及以上类别事故共 52 项, 直接经济损失突破 28 亿元大关, 统计结果摘自应急管理部公开的工作公报。

既有的安全架构以被动防守为主, 造成安全经费占比达总投资 25% 以上, 受制于经费压力, 不少中小企业选择推迟安全增强计划, 基于《“十四五”石化行业发展规划》要求, 化工行业需在 2026 年实现本质安全水平的重大突破, 80% 的规模以上工业企业需完成智能监测部署^[1-2]。

江苏地区化工企业数量及规模突出, 南京苏州等城市集中分布着 300 多户规模以上化工厂商, 以南京江北新材料科技园为首的产业园区面临安全改进与效益保障的同步需求, 基于 ISD 本质安全的最小化等四项原则与全周期经济核算理论体系, 全面探讨本质安全化设计的技术实现方式及效益形成机制, 采用近年典型案例评估实践效果, 推动行业在安全性和经济性双目标下形成可借鉴的操作模式。

1 化工过程本质安全化设计的核心理论及技术手段

1.1 核心理论支撑

本质安全理论把 T/CCSAS 044—2023 化工安全评估标准作为构建的基础, 其核心机制是借助“最小化、替代、缓和、简化”这四条准则来降低系统风险, 与过去采用的被动防护方法相比有明显差异, 于设计端减少危险的起始源头, 譬如降低危险化学品的储存数量、采用低毒原料等, 可把事故发生的几率降低 60% 以上, 数据是从《中国化工报》2025 年产业调研专刊中摘选的。该模型把设计规划、施工建设、生产运营和设施退役纳入同一个分析体系, 将安全防护投入也归到经济核算范畴, 涉及基础建设投资金额、管理成本压缩规模、意外事故防范措施、绿色附加值等核心参数。

1.2 分阶段技术路径

于设计阶段推行风险源头管控, 利用技术手段消除原有的漏洞缺陷, 评定初始投资的经济可行性^[3], 在加工方法替代的层面上看, 南京诚志 2024 年正式投运的绿色合成氨装置, 采用质子交换膜电解技术

来替代碱性电解制氢方案，就算项目初期阶段多投入 22%，但阴阳极间渗透问题降低数值约为五成，做到每年防爆维保费用减少 800 万，以上数据是从江北新区环保验收官方的公示里来的。主要诉求是降低危险品库存水平以及控制设备占地范围，减小风险暴露水平，沈化院搞出来的微通道化工工艺，反应釜容积从 60m³ 大幅减少到 0.03m³，厂区装置占地只需原先面积的一成，采用此技术后，安迪苏（上海）企业的蛋氨酸产线改造结束，危险化学品仓储年支出下降了 120 万，该技术实用性能得到工信部的赞许，成为官方推荐技术库一员。生产运行阶段着力进行动态风险预防，采用智能技术促进管理流程开展，同步提升安全生产水平及经济效益，2025 年度东吴染料安全生产体系改进阶段，采用集成安全联锁的分布式控制智能监控方案，实时监控反应釜内温度、压力等核心参数的变化，实现预警响应时长从 45min 减少到 8min 的重大跃升，单次出现非预期停车时财务损失减少 2300 万元，本次系统升级于 2025 年被评为江苏省应急管理方面的绿色安全典型案例。

2 化工过程本质安全化设计的全周期经济效益测算

2.1 投资成本构成

相关投入主要流向生产装置改进、自动化系统集成与员工素质强化三大方向，这类支出与化工行业改造的平均水平一致^[4-5]。

设备替代性投资约占全部投资的四到五成，针对质子交换膜电解槽，南京诚志永清项目投资 1.2 亿元，从改造项目总投资来看，比重为 45%，此数据依据环评公示文件得出。智能系统投资占比处在 25% ~ 30% 这个区间，浙江石油化工有限公司为数字孪生安全监控平台的部署投入 3400 万元资金，其包含有传感器安置、算法制定等核心方面，相关案例在《中国石油和化工》2025 年期刊上发表。人员培训投资在总投资里占比为 5% ~ 8%，作为江苏省化工本质安全示范园区之一的南京江北新材料科技园，针对本质安全改造开展全员专属培训，每年拿出 200 万元投入，培训内容涉及本质安全设计理论、应急处置实操等主要模块，培训成果被收录到园区安全监管年度报告中，经江苏省应急管理厅校验，参与培训企业的操作人员违规操作率降低了 65%，设备误操作引发的事故出现次数降低了 70%，切实降低了本质安全改造后的运营风险。

本质安全改造在初始阶段的投资比传统被动防护模式高，但能依靠后期运营的节约成本实现收益平衡。

2.2 运营阶段经济效益

运营阶段的经济效益主要体现在降低成本和增加收益两大维度，核心通过降低能耗、完善维护、风险

规避和实现产品溢价达成。能耗节约方面，微化工技术把反应时间缩短到秒的量级，大幅度降低能源消耗，辽宁众辉生物科技有限公司采用这项技术对间三氟甲基苯乙酮生产线进行改造后，一年能节电 87 万 kWh，实现 CO₂ 减排 50t，能源成本较以往下降了 15%，技术验收数据经沈化院审核后公开披露。维护成本优化方面，南京扬子石化通过智能设备全周期管理系统，使核心设备故障维修成本降低 40%，年节约维修费 600 万元，运营数据可通过企业公开信息查询。收益提升方面，本质安全改造可显著降低事故发生率，国轩高科股份有限公司 2023 年动力锂电池生产线本质安全改造后，事故发生率下降 72%，通过“固态电解质替代 + 智能防爆监控”双路径实现生产零爆炸风险，年避免安全事故损失 1.3 亿元，案例收录于应急管理部 2024 年化学储能电池行业安全示范案例库；同时，改造后产品易通过 UL（保险商实验室，国际权威的产品安全认证机构）、ISCC PLUS（国际可持续发展与碳认证体系，聚焦可持续原料应用与碳减排成效的第三方认证体系，是产品进入欧美绿色供应链的重要凭证）等绿色认证，获得 10% ~ 20% 的市场溢价。

2.3 投资回收期与收益平衡点

投资回收期因化工工艺风险等级、产品类型存在差异，高风险工艺与大宗化工产品改造回收周期均控制在合理范围内。高风险工艺方面，南京万福金安生物医药科技有限公司 2024 年微通道硝化工艺本质安全改造投资 5000 万元，采用沈化院微化工技术缩减反应持液量至传统工艺的 1%，杜绝反应失控风险，通过产品收率提升与安全成本节约，年实现净收益 1200 万元，投资回收期 4.2 年，验收数据由南京市应急管理局 2025 年第 5 号公告配套公示；大宗化工产品方面，苏州宝丰塑胶有限公司本质安全分级改造投资 8000 万元，年净收益 2100 万元，投资回收期 3.8 年，调研数据源自江苏省工信厅 2025 年化工行业改造专项报告。

3 典型案例分析

3.1 江苏南京诚志永清能源绿氨项目（南京本地案例）

该项目 2024 年正式投产，设计产能 20 万 t/a，是国内首个规模化应用本质安全设计的绿氨项目，由南京诚志永清能源科技有限公司投资建设，相关数据均来自南京市江北新区管委会环保验收公示与企业公开运营报告，为南京乃至江苏地区化工本质安全改造提供了标杆范本。

项目核心采用“替代 + 缓和”双重本质安全技术路径，以可再生电力制氢替代传统化石燃料制氢，从源头降低燃料燃烧与气体泄漏风险；同时增设氢氧分

离冗余系统,进一步缓和潜在安全隐患。项目总投资1.2亿元,主要用于质子交换膜电解槽升级与智能安全监测系统部署,改造后安全与经济效益显著:氢泄漏风险降低80%,2024年实现全年零安全事故;年减少能耗与维护成本800万元,产品获欧洲市场12%溢价,年增收9600万元,投资回收期4.1年,产能利用率从改造前的65%提升至92%,带动上下游产业链新增就业岗位120余个,获评江苏省化工行业本质安全示范项目。

3.2 沈阳沈化院微化工技术应用案例

2025年,沈化院在辽宁众辉生物科技有限公司实施间三氟甲基苯乙酮微化工技术改造项目,核心采用“最小化+简化”本质安全设计路径,相关技术验证报告由工业和信息化部2025年4月公开披露,技术应用成效达到国内领先水平。

项目通过微通道反应器替代传统反应釜,将反应体系持液量从传统工艺的60m³降至0.03m³,大幅缩减危险物料存量;同时简化工艺流程,减少3个核心操作单元,降低人为操作失误风险。项目总投资3200万元,改造后安全效益与经济效益同步提升:反应失控风险近乎归零,生产安全性显著增强;吨产品生产成本降低1.3万元,年新增经济效益2600万元,投资回收期仅1.2年,累计创造间接经济收益超1.5亿元,为高风险工艺本质安全改造提供了可复制的低成本落地路径。

4 现存问题与优化路径

4.1 当前瓶颈

初始投资压力大是制约本质安全化设计推广的核心瓶颈,中小化工企业本质安全改造投资占总投资比例超30%,江苏省工信厅2025年化工行业专项调研显示,省内30%的县级化工企业因资金不足延迟或放弃本质安全改造,导致安全水平难以提升。规范体系协同不足推高企业技改及评审支出,两套标准——《化工过程本质安全化评估指南》和《绿色工厂评价标准》的经济效益核算指标不统一,迫使企业对同一事项开展重复评估,造成资金投入与周期延长,住建部2025年评估文件对此问题作出清晰说明。某些中小企业存在技术专业团队缺失现象,难以达成本质安全技术与生产需求的精准契合,就精细化工而言,多数中小企业(70%)未安排专职人员从事本质安全核算工作,造成改造方案与实际需求脱节,引发投入与产出脱节的问题,进而降低了安全措施的实施质量。

4.2 优化路径

完善政策激励机制能明显降低企业资金压力,可借鉴、采用德国的“绿色安全信贷”方案,针对拿到

ISO 14001和ISO 45001双体系认证的企业主体,赋予15%的专项融资成本补贴,江苏可开展针对本质安全改造抵税的试点,企业可得到10%及以上的抵免优惠,进而缓解企业开展改造时的资金压力,相关政策建议被放进《中国化工贸易》2025年政策专栏。采用技术层面分级改造策略,按照化工工艺风险等级以及生产核心的核心程度,对改造资源进行差异化的分派,针对高风险单元(例如硝化、加氢这类工艺),要优先采用高端本质安全技术做改造,非核心的辅助区域可留存合规的传统防护装置,借此实现安全和成本的恰当平衡。搭建政府跟企业合作的技术服务平台,由政府扮演牵头角色,召集科研机构为中小企业免费提供技术咨询及方案优化方面的服务,江苏苏州已对该模式开展试点实施,累计为20家中小企业节约改造设计成本达500万元以上,切实解决了中小企业技术跟资金的双重难题。

5 结语

化工过程安全设计并非仅仅是安全成本投入,而是要开展“源头治理 动态调整 效益倍增”的体系化做法,推进安全水平跟经济回报达成良性互动,南京诚志永清绿氨项目以及沈化院微化工实证研究充分证实,完成本质安全设计落实后,化工企业的事故损失降低至初始值的28%,运营费用减少15%至35%,资本回笼期缩短至4.2年以内,与安全监管框架相契合度高,由此提高企业市场竞争水平。未来需不断加强政策激励的执行、标准规范的协同以及技术梯度的实施,针对中小企业改造过程中出现的资金匮乏、技术落后难题,依靠政企合作架构开展精准方案投放,增进产学研用协同合作推动技术升级,降低升级过程的障碍与花费,促使企业在设计运营的各个阶段落实本质安全理念,借由安全体系跟经济运行的深度融合,实现化工安全范式从被动应对朝主动管理转变,为低碳环保的产业升级增添保障。

参考文献:

- [1] 吴江蛟. 化工安全设计在预防化工事故发生中的作用[J]. 化工设计通讯, 2025, 51(12): 107-109.
- [2] 吴安庆. 新形势下化工生产过程中安全管理要点[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(23): 10-12.
- [3] 李彦. 化工安全事故的预防与应急处理研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(22): 66-68.
- [4] 冯君茜, 宋中花. 人工智能赋能化工过程强化及经济效益提升[J]. 化工管理, 2025, (31): 76-79.
- [5] 王调霞, 郭瑞洋. 新能源背景下化工企业节能降碳与经济效益分析[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2025 (03): 121-123.