

危化品安全关键技术应用与综合效益评价研究

袁康 郝珈禾 (陕西延长石油(集团)有限责任公司炼化公司, 陕西 延安 716000)

摘要: 本文以S省某炼化企业为例, 针对危化品安全技术应用中存在的系统孤立、预警滞后、管理依赖经验及效益衡量模糊等问题, 提出建设融合平台、开发智能诊断模型、推行预测性维护与构建数字孪生演练系统等协同增效优化路径。通过案例对比分析, 量化验证了技术集成应用在提升预警精度、降低非计划停车、增强应急效能等方面的综合效益, 为行业安全技术选型与效能提升提供了实证参考。

关键词: 危化品安全; 关键技术; 综合效益评价; 炼化企业

中图分类号: X937

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167(2026)010-0094-03

Research on comprehensive benefit evaluation of key technology application in hazardous chemical safety

Yuan Kang, Hao Jiahe (Refining and Chemical Company of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Yan'an Shaanxi 716000, China)

Abstract: Taking a refining and chemical enterprise in Province S as an example, this paper addresses issues such as system isolation, lagging early warning, reliance on experience in management, and vague benefit measurement in the application of hazardous chemical safety technology. It proposes collaborative optimization paths, including building an integrated platform, developing an intelligent diagnostic model, implementing predictive maintenance, and constructing a digital twin exercise system. Through comparative case analysis, the comprehensive benefits of technology integration application in improving early warning accuracy, reducing unplanned downtime, and enhancing emergency response efficiency are quantitatively verified, providing empirical reference for industry safety technology selection and efficiency improvement.

Keywords: hazardous chemical safety; key technologies; comprehensive benefit evaluation; refining enterprise

石油化工是我国重要的支柱产业, 其生产过程涉及大量易燃、易爆、有毒有害的危险化学品, 本质安全水平要求极高。近年来, 随着自动化、信息化技术的广泛应用, 行业安全硬件保障能力已显著提升, 然而, 各类安全技术系统往往独立建设、分散运行, 未能形成有效合力。在实际运营中, 数据壁垒导致的全局态势感知困难、传统阈值报警对复杂风险预警的乏力、以定期检修和人员经验为主的设备管理模式, 以及安全技术投资回报难以量化等深层次问题逐渐凸显。这些问题的存在, 制约了安全管控效能从“符合规范”向“卓越绩效”的跃迁。在此背景下, 如何系统识别安全技术应用的瓶颈, 规划面向协同增效的优化路径, 并对其产生的综合效益进行科学评价, 已成为行业推进安全生产治理体系和治理能力现代化的关键课题。

1 石油危化品行业安全技术现状问题

1.1 系统独立运行与数据共享壁垒

炼化企业里, DCS、SIS、GDS 还有设备监测这些系统, 大多都是独立运行的独立系统。因为数据格式、协议还有接口标准不统一、不统一, 很容易就形成了“信息孤岛”。就拿关键机泵来说, 它的振动数据、工艺参数, 还有周边的气体浓度数据, 都分别存在不同系统里、不同系统中。这就导致全局风险动态评估这类高级应用, 根本没办法顺利实现。管理人员得人

工去跨平台整合信息, 不仅效率特别低下, 遇到紧急情况时, 还可能会延误决策、耽误处置。数据共享存在的技术和管理壁垒, 现在已经成了安全管控向系统化、智能化方向迈进的首要障碍、主要阻碍。

1.2 预警精度不够, 响应决策也常常滞后

目前很多预警还只是依赖简单的阈值报警, 遇到复杂工况下那种缓慢演变、或者多个参数耦合在一起的潜在风险, 现有的预警在精度和时效性上都明显不够。有统计显示, 差不多 30% 的常规报警其实属于滋扰报警, 这既增加了操作人员的负担, 也可能导致真正的风险被忽视掉。另外, 预警和应急预案的联动大多还停留在纸面上, 缺少数字化的智能决策支持。报警触发后, 操作人员往往得凭经验手动去查规程, 导致响应决策总是慢一拍, 白白消耗掉了关键的风险处置时间窗口。

1.3 设备管理仍然依赖定期检修和经验判断

目前大多数厂家的设备安全管理, 还是高度依赖定期检修(TBM)和工程师的个人经验。RBI和CBM这些理念虽然已经引入行业了, 但在很多炼油厂里应用仍然不足。比如说, 临氢管道内部的损伤很难被发现, 压缩机组的故障诊断也没法全靠模型预测——这些潜在故障都可能引发非计划停车甚至事故。有时候还会出现对状态良好的设备过度检修的情况, 既浪费

了资源,还可能引入新的风险。随着设备越来越复杂、工艺不断更新,光靠经验驱动的局限性也越来越明显。

1.4 技术迭代慢,投资效益衡量也比较模糊

行业对数字孪生、AI 预测性维护这类前沿安全技术的采纳,整体上还是比较谨慎。除了初期投入比较高之外,更主要的原因还是它们的综合效益缺乏清晰的量化体系。安全技术投资回报往往很难直接用财务指标计算,它的效益常常体现在“避免了哪些损失”,带有概率性和隐性特征。正因为缺少那种结合事故概率、潜在损失、保险费用等多维度的公认效益量化模型,很多真正能提升安全水平的技术升级方案,在投资决策过程中很容易就被搁置了。

2 面向协同增效的安全技术优化路径

2.1 建设厂级安全信息融合与应急指挥平台

为破解“信息孤岛”困局,需构建统一的厂级安全信息融合与应急指挥平台。该平台遵循 IEC 62443 等标准,通过工业数据网关与适配器,对来自 DCS、SIS、GDS、视频监控等异构系统的数据进行标准化采集与汇聚。核心在于建立企业级数据模型与标签体系,在时空维度上关联融合实时工艺、设备状态、风险报警及应急资源等信息。平台提供统一监控视图、全局报警管理与事故推演功能。一旦触发高级警报,可自动关联应急预案、三维模型、泄漏扩散模拟与应急资源分布,形成“一站式”决策看板,从而将应急响应从分散的经验驱动模式,转变为集中、数据驱动的共同模式,显著提升处置效率与科学性。

2.2 开发基于多源数据融合的智能诊断模型

应对预警精度不足,不能仅仅依靠单一阈值报警。开发基于多源数据融合与机器学习的智能诊断模型是有力的补充。其核心是利用历史操作、设备状态及事件记录数据,对生产过程正常状态进行建模。例如,大型离心压缩机的模型需同时分析轴振动、位移、轴承温度、进出口压力与流量、介质组分和润滑油参数等数十个变量。使用 PCA、SVM 等算法,系统学习变量在正常状态下的相互关系和动态模式。当实时数据与模型预测出现持续的偏差,系统可以提前数十小时发出早期预警并初步定位异常根源(如叶轮结垢或轴承磨损),实现从发生后报警到未发生的预警转变,同时大幅降低误报率,为预测性维修与工艺调整赢得时间。

2.3 推行预测性维护与设备健康管理体系

建立预测性维护(PDM)与设备健康管理(EHM)体系,可以使企业摆脱对传统定期检修的过分依赖。首先,企业内部静设备和关键动设备需要进行合理分级,然后通过布设传感器网络,持续采集压力、声发射、温度、振动等各类过程参数。该数据会被统一传

到 PDM 专业平台,平台借助智能诊断模型、趋势分析以及频谱分析等对设备状态开展评估。结合设备的风险等级和健康评分,系统可以反馈出相应的维护建议。该模式可以推动维修模式从固定周期转向基于状态的维护。如,想要准确评估高压反应釜剩余寿命和检验窗口,同时减少无效停车,可以监测高压反应釜壁厚、腐蚀探针、裂纹声发射等数据来辅助判断。整合工艺、设备和维修的数据流程,形成监测、诊断、决策、执行、反馈的闭环是整个体系实施的关键,该举措可以在优化维护成本的同时保障安全生产。

2.4 构建基于数字孪生的安全培训与演练系统

在安全效益衡量不够清晰、人员实战能力又急需提升的情况下,构建基于数字孪生的安全培训与演练系统,是高效的可行路径。这套系统以工厂三维模型、工艺机理模型和数据驱动模型为基础,搭建出和实际物理工厂高度同步一致的虚拟镜像。它不仅开展常规的操作培训,还能模拟泄漏、反应失控、全厂停电等多种异常和事故场景。参训人员能在沉浸式虚拟环境里,安全开展工艺处置、消防器材使用和应急协同演练。系统会自动记录操作过程、时间节点与决策逻辑,并在事后给出量化评估和复盘总结。这种方式突破了传统演练成本高、风险大、场景有限的问题,通过高保真、可重复的压力测试,有效提升人员技能与心理素质,其产生的隐性安全效益,也为技术投资的评价提供了可量化、可衡量的重要维度。

3 项目应用综合效益案例分析

3.1 案例介绍

本文研究案例选取 S 省 YC 石油(集团)有限责任公司下属的大型炼油厂。该厂配备有常减压、连续重整、催化裂化、加氢裂化等核心装置,并有配套罐区。该厂生产涉及易燃易爆、高温高压、有毒害等危险工作情况,对与安全的管控要求很高,故具有研究价值及行业代表性。该炼油厂虽基础安全设施配备完善,但在智能化管理转型中依然存在较明显的系统问题。如安全系统运行较为独立,数据无法共享,导致形成信息壁垒、联动效率低下。该炼油厂设备维护与风险管控大多依赖检修人员经验判断和计划内检修,故对潜在故障预测不准确,预警能力不足,无法满足炼油厂安全管理实际需求。

3.2 技术集成应用前后的综合效益量化对比分析

为应对前面提到的这些挑战,该炼厂启动了安全管控能力提升项目,项目核心就是数据融合、智能预警、预测维护。项目主要实施了四项关键策略,分别是:搭建厂级安全信息融合平台,打通数据壁垒;在关键机组上部署基于多源数据的智能诊断模型;在动设备

管理中推行预测性维护体系；同时构建基于数字孪生的应急演练系统。经过一段时间实际运行后，项目在安全水平和运营效益上都取得了明显成效。

分析显示，通过安全关键技术的整合应用与协同优化，炼厂在安全、运营和经济效益上都获得了同步提升。具体的综合效益主要表现在以下四点：

一是直接经济效益明显。关键设备的非计划停车次数，从之前年均 8-10 次降到了 2-3 次。经核算，单次非计划停车的直接损失加上开停车成本，平均大约 120-150 万元。如此累积，这个项目每年能避免的直接经济损失在 600-1200 万元之间。另外，预防性维修的占比从原来的约 60% 提高到了 80% 以上，维修模式也从周期性的“过度检修”逐渐转变为精准的“按需检修”。这种转变让备件库存和人力配置更加合理，年度维护直接成本降低了约 15%-20%，还减少了因为不必要拆装设备而引发的二次故障风险。

其次，风险成本和隐性损失被有效控制。智能预警和预测性维护体系，将事后处理的模式转变成了事前预防。此举很大程度上降低了小隐患发展成重大事故的可能性。也就是说，如事故应急费用、环境修复开销、停产赔偿、行政处罚还有商誉损失等那些原本可能出现的巨额风险成本，现在都得到了有效规避。与此同时，数字化提升也在安全管理绩效方面得到了实现，这不仅为企业争取更优惠的安全生产责任保险费率提供了依据，也形成了风险减少、财务负担减轻的良性循环。

三是运营效率和整体组织效能都在持续提升。这个安全信息融合平台，它实现了跨系统数据的集中管理，还能把不同数据关联起来，并且做到可视化呈现。这样一来，管理决策就不再只靠个人经验或者那些碎片化的报表了，而是转向基于全景实时数据的协同研判模式。这样的改变，不仅把高级报警的平均响应时间从原来的超过 15min，缩短到了 5min 以内；而且在日常工作中，也明显减少了跨部门之间反复沟通、核对信息的时间成本。另外，那个基于数字孪生技术开发的演练系统，也发挥了很大作用。它能用几乎零风险、低成本的方式，大幅提升人员的操作技能和应急熟练度。这种系统带来的组织学习效果 and 人力资源准备度的提升，其实是一种具有长期价值的隐性收益，这种收益不太容易直接量化，但确实很重要。

最后，该项目的战略价值与社会效益明显。项目实施的成功使企业在安全生产方面智能化水平迈入行业前列水平。该举措不仅塑造了企业负责任的品牌形象，也加强了企业在合规方面的基础，同时增强了合作伙伴、政府的信任。长期来看，在战略层面，该项目所积累的核心数据以及数字化方面的改造为后续企

业接入工业互联网并实现更高级别的可持续发展奠定了坚实的基础。

整体分析来看，本研究对象在实施相关策略后，投资回报周期合理且长期效益显著。案例充分验证了以智能协同和数据融合为核心的安全技术优化路径具有较突出的经济性，可以在行业内广泛推广。

4 结语

本文通过分析石油危化品行业安全现状，提出优化路径并用实际案例进行验证，指出了打破技术与管理的壁垒是安全技术从单点部署到系统协同转变的关键。以预测性维护代替被动检修，借助数据融合实现智能预警，利用先进数字技术重塑应急模式，最终全面提升石油危化行业的安全、管理与经济效益。随着人工智能与大数据的进一步融合以及工业互联网的普及，安全协同发展的维度将更深更广。未来，构建开放式、标准化的安全技术生态系统与基于全域感知和自主决策的智能安全新模式，将成为行业高质量、高水平发展的支撑。

参考文献：

- [1] 刘飞超. 基于智能监控技术的储油库危化品安全管理研究 [J]. 石化技术, 2025, 32(10): 216-218.
- [2] 王建意. 化工企业危化品存储、运输与使用安全管理对策研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(15): 70-72.
- [3] 臧艳茹. 数字化检验检测技术在危化品领域的应用研究 [J]. 化工装备技术, 2025, 46(03): 5-7.
- [4] 孙泽. 运用人工智能提高化工生产安全管理效果 [C]// 广西网络安全和信息化联合会. 第七届工程技术管理与数字化转型学术交流论文集. 中国航空油料有限责任公司贵州分公司, 2025: 449-450.
- [5] 申延智. 危化品运载罐体安全关键成型技术. 安徽省, 芜湖中集瑞江汽车有限公司, 2024-07-23.
- [6] 金海波. 某油气陆地终端危化品重大危险源辨识与风险管理 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(08): 4-6.

作者简介：

袁康 (1992-), 男, 陕西省汉中市人, 汉族, 大学本科学历, 陕西延长石油(集团)有限责任公司炼化公司, 助理主管, 工程师, 注册安全工程师, 研究方向: 石油化工安全管理;

郝珈禾 (1992-), 男, 陕西省延川县人, 汉族, 硕士研究生学历, 陕西延长石油(集团)有限责任公司炼化公司, 科员, 注册安全工程师, 研究方向: 石油化工安全管理。