Journal of Security and Safety Technology 安防技术, 2026, 14(3), 127-136
Published Online September 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/jsst
https://doi.org/10.12677/jsst.2026.143014

Hans汉斯

氯碱工艺危险化学品双重预防机制构建与实践

赫妍妍[1*]，马汉鹏[2]，余佳亮[1]

[1]应急管理大学矿山安全学院，河北 廊坊
[2]应急管理大学安全工程学院，河北 廊坊

收稿日期：2026年8月18日；录用日期：2026年9月11日；发布日期：2026年9月17日

摘 要

为解决氯碱工艺危险化学品安全风险管控难题，弥补现有双重预防机制在罐区重大危险源针对性适配不足、智能化监控与现场风险防控需求脱节的问题，本研究基于AQ 3036-2010标准规范与双重预防机制核心要求，采用作业危害分析法与安全检查表法，对氯碱工艺生产、储存及运输全流程的危险有害因素进行系统辨识。研究构建了包含可能性、严重性及可监测性三个维度的风险分级指标体系，运用风险矩阵法确定各风险点的等级，并据此制定差异化的风险管控措施。同时，依据罐区安全监控装备设置要求，设计了硬件感知层、数据传输层、软件支撑层与应用服务层四层架构的智能化监控平台，实现对工艺参数、环境浓度及安全状态的动态监测、三级智能预警及应急联锁控制。在某大型氯碱企业为期一年的实践应用中，风险辨识覆盖率从85%提升至100%，重大风险管控覆盖率达100%；隐患整改完成率从82%提升至98%以上；电解槽超温超压预警准确率达99%，罐区泄漏监测响应及时率达100%；设备完好率从90%提升至98%，人员操作合规率从88%提升至97%，年新增经济效益约800万元，且未发生一般及以上安全生产事故。该双重预防机制有效实现了氯碱工艺危险化学品的风险分级管控与隐患排查治理闭环管理，显著提升了企业安全绩效，可为氯碱行业及相关高危化工领域的安全管理提供可复制的技术方案与实践经验。

关键词

氯碱工艺，危险化学品，双重预防机制，风险分级管控，隐患排查治理，智能化监控，罐区安全

Construction and Practice of Dual Prevention Mechanism for Hazardous Chemicals in Chlor-Alkali Process

Yanyan He[1*], Hanpeng Ma[2], Jialiang Yu[1]

[1]School of Mine Safety, University of Emergency Management, Langfang Hebei
[2]School of Safety Engineering, University of Emergency Management, Langfang Hebei

[*]第一作者。

文章引用: 赫妍妍, 马汉鹏, 余佳亮. 氯碱工艺危险化学品双重预防机制构建与实践[J]. 安防技术, 2026, 14(3): 127-136 DOI: 10.12677/jsst.2026.143014

Received: August 18, 2026; accepted: September 11, 2026; published: September 17, 2026

Abstract

To address the safety risk control challenges of hazardous chemicals in the chlor-alkali process and to fill the gap in the existing dual prevention mechanism regarding the insufficient targeted adaptation to major hazards in tank areas and the disconnection between intelligent monitoring and on-site risk control needs, this study, based on the AQ 3036-2010 standard and the core requirements of the dual prevention mechanism, utilized the Job Hazard Analysis and Safety Checklist methods to systematically identify hazardous and harmful factors throughout the entire process of production, storage, and transportation in the chlor-alkali process. A risk classification index system encompassing three dimensions of possibility, severity, and detectability was established. The risk matrix method was employed to determine the risk levels of each risk point, and differentiated risk control measures were formulated accordingly. In accordance with the requirements for the installation of safety monitoring equipment in tank areas, a four-layer intelligent monitoring platform was designed, including hardware perception layer, data transmission layer, software support layer, and application service layer, to achieve dynamic monitoring of process parameters, environmental concentrations, and safety conditions, as well as three-level intelligent early warning and emergency interlock control. During a one-year practical application in a large chlor-alkali enterprise, the risk identification coverage rate increased from 85% to 100%, and the coverage rate of major risk control reached 100%; the completion rate of hidden danger rectification rose from 82% to over 98%; the accuracy rate of over-temperature and over-pressure early warning for electrolytic cells reached 99%, and the timely response rate of tank area leakage monitoring was 100%; the equipment integrity rate increased from 90% to 98%, and the compliance rate of personnel operations rose from 88% to 97%, with an annual increase in economic benefits of approximately 8 million yuan, and no general or higher-level production safety accidents occurred. This dual prevention mechanism effectively achieves closed-loop management of risk classification control and hidden danger investigation and governance for hazardous chemicals in the chlor-alkali process, significantly enhancing enterprise safety performance, and can provide replicable technical solutions and practical experience for safety management in the chlor-alkali industry and related high-risk chemical fields.

Keywords

Chlor-Alkali Process, Hazardous Chemicals, Dual Prevention Mechanism, Risk Classification and Control, Hidden Danger Investigation and Governance, Intelligent Monitoring, Tank Farm Safety

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

氯碱工业是基础化学工业的重要组成部分，其生产过程涉及氯气、氢气、氢氧化钠等多种危险化学品，具有高温高压、易燃易爆、有毒有害等特点。近年来，我国氯碱行业安全生产形势总体稳定，但事故仍时有发生，违规操作、设备老化、风险管控不到位等因素均可能引发安全事故，造成人员伤亡和财产损失。双重预防机制作为防范化解安全生产重大风险的核心制度，通过风险分级管控将关口前移，结合隐患排查治理实现闭环管理，推动安全管理从被动应对向主动预防转变[1]。

国外化工行业风险管控起步较早，形成了以风险矩阵法为核心的分级管控体系，在石油化工领域构建了覆盖全流程的智能化监控网络[2]，其动态风险评估与联锁控制技术为氯碱工艺安全管理提供了有益借鉴。国内学者围绕双重预防机制开展了大量研究，但多集中于理论框架构建或单一环节的风险管控，针对氯碱工艺复杂生产流程，特别是罐区重大危险源的专项机制研究仍然不足[3] [4]。现有机制普遍缺乏对氯碱介质特性与罐区存储工况的针对性适配，智能化监控功能与现场风险防控需求存在脱节。《危险化学品重大危险源 罐区现场安全监控装置设置规范》对罐区安全监控装备的配置提出了明确要求，为双重预防机制在氯碱行业落地提供了技术依据[5]。

针对上述问题，本文聚焦氯碱罐区这一核心高风险场景，从风险量化分级方法、标准规范的技术转化以及智能化平台的落地路径三个层面展开研究：构建适配介质高危险性与存储高风险特征的专项风险分级指标体系；整合罐区多维度监测数据，设计具备参数联动预警与应急联锁控制的智能化监控平台，并厘清 AQ 3036-2010 标准要求向设计参数的转化逻辑；建立风险分级管控与隐患排查治理的动态联动机制，实现罐区风险全生命周期管控，并通过经济效益测算验证机制的价值。研究成果可为氯碱企业及同类高危化工企业完善双重预防机制、提升智能化安全管理水平提供技术支撑与实践参考[6]。

2. 氯碱工艺危险化学品风险特征与管控现状

2.1. 氯碱工艺危险化学品风险特征

氯碱工艺以食盐为主要原料通过电解法生产氯气、氢气、氢氧化钠等产品，生产流程涵盖盐水精制、电解反应、氯气处理、氢气回收、碱液蒸发等环节，各环节均存在显著安全风险。原料与产品多为易燃易爆、有毒有害介质，氯气具有强氧化性与腐蚀性，其泄漏可能导致人员中毒窒息；氢气爆炸极限宽遇火源易引发爆炸事故；氢氧化钠具有强腐蚀性，可能造成设备腐蚀与人员灼伤。

生产过程需在高温高压条件下进行，电解槽运行温度通常维持在 85℃~90℃，工作压力为 0.3~0.5 MPa，设备长期处于苛刻工况易发生腐蚀泄漏等故障。工艺系统关联性强，某一环节故障可能引发连锁反应，如电解槽膜破损可能导致氢气与氯气混合引发爆炸，盐水精制不彻底会造成电解槽结垢影响运行安全。罐区作为危险化学品储存核心区域，涉及多种介质储罐，其液位、温度、压力等参数波动直接影响安全状态，需严格遵循安全监控装备设置规范。

2.2. 氯碱工艺危险化学品管控现状

当前氯碱企业已建立基本安全管理制度，但风险管控仍存在诸多短板。风险辨识缺乏系统性，多聚焦于事故后追溯，未实现全流程覆盖，部分企业对潜在风险识别不全面，管控措施针对性不足。隐患排查多依赖人工检查效率低下且易出现遗漏，缺乏智能化监测手段难以实现实时预警。

安全监控装备配置不符合标准要求，部分老企业罐区未按规定设置可燃气体、有毒气体监测报警仪，或仪器安装位置不当、监测精度不足。双重预防机制运行缺乏闭环管理，风险分级与隐患排查脱节，整改措施未有效落实且缺乏效果评估。现有管控模式多为被动应对，难以适应氯碱工艺复杂风险特征，亟需构建科学系统的双重预防机制提升安全管理水平。

3. 双重预防机制核心理论与构建原则

双重预防机制包括风险分级管控与隐患排查治理两个核心环节。风险分级管控前提是通过辨识评估风险确定管控等级与措施，实现风险关口前移；隐患排查治理是关键，通过常态化排查及时消除隐患，防止风险演变为事故，两者相互衔接，形成全流程管控链条。该机制以风险管控为主线，横向覆盖人员、设备、物料、工艺、环境等所有风险要素，纵向贯穿风险辨识、评估、管控、隐患排查、整改、销号等关

键环节，中间通过智能化监控技术实现数据互通与动态联动。风险分级管控以科学风险评估为基础，按严重程度划分风险等级并制定差异化管控策略；隐患排查治理以风险管控薄弱环节为重点，建立闭环管理流程确保隐患及时消除。两者协同作用，构建事前预防、事中控制、事后处置的全链条安全防线[7]。

氯碱工艺双重预防机制的构建需遵循系统性、科学性、实用性、动态性与智能化五项原则。(1) 系统性原则要求覆盖氯碱工艺生产、储存、运输全流程，涵盖人员、设备、物料、工艺、环境等所有风险要素，确保风险无死角管控。(2) 科学性原则要求采用标准化风险辨识方法与分级标准，结合氯碱工艺特性制定科学合理的管控措施，符合相关安全监控装备设置规范的要求。(3) 实用性原则要求机制设计贴合企业实际生产情况，管控措施具有可操作性与经济性，避免形式化管理。(4) 动态性原则要求建立风险动态更新机制，根据工艺调整、设备更新、环境变化等情况及时更新风险信息，调整管控措施。(5) 智能化原则要求融入先进监控技术与信息化管理手段，提升风险监测与隐患排查的效率和准确性。

4. 氯碱工艺双重预防机制构建

4.1. 风险分级管控体系构建

4.1.1. 风险辨识

本研究采用作业危害分析法与安全检查表法相结合的方式，对氯碱工艺全流程开展系统风险辨识。辨识范围包括盐水精制车间、电解车间、氯气处理车间、氢气回收车间、碱液蒸发车间以及原料产品罐区、装卸站台等区域，重点辨识化学性风险、物理性风险、机械性风险、电气性风险等危险有害因素。

化学性风险主要包括氯气、氢气等介质泄漏引发的中毒、爆炸、腐蚀等风险；物理性风险包括高温高压导致的设备超温超压风险；机械性风险包括泵、阀、管道等设备故障引发的泄漏风险；电气性风险包括爆炸危险环境下电气设备失爆引发的点火源风险。辨识过程需结合《危险化学品重大危险源 罐区现场安全监控装置设置规范》要求，重点关注罐区等重大危险源区域的风险因素。

4.1.2. 风险分级指标体系

Table 1. Risk classification indicator system and weight table
表 1. 风险分级指标体系及权重表

一级指标	二级指标	分级标准	权重
可能性	设备完好率	一级：≥98%；二级：95%~97%；三级：90%~94%；四级：<90%	0.35
可能性	操作规范性	一级：合规率 ≥ 97%；二级：93%~96%；三级：88%~92%；四级：<88%	0.35
可能性	安全管理水平	一级：制度完善且执行率 100%；二级：制度完善执行率 90%~99%；三级：制度基本完善执行率 80%~89%；四级：制度不完善或执行率 < 80%	0.30
严重性	人员伤亡程度	一级：无伤亡；二级：轻伤 1~2 人；三级：重伤 1~2 人或轻伤 3~5 人；四级：死亡 1 人及以上或重伤 3 人及以上	0.40
严重性	财产损失规模	一级：<10 万元；二级：10 万~50 万元；三级：51 万~500 万元；四级：>500 万元	0.30
严重性	环境影响范围	一级：无影响；二级：厂区内局部影响；三级：厂区周边 500 米内影响；四级：厂区周边 500 米外影响	0.30
可监测性	监测设备覆盖率	一级：100%覆盖；二级：90%~99%覆盖；三级：80%~89%覆盖；四级：<80%覆盖	0.30
可监测性	监测数据准确性	一级：误差 ≤ ±0.5%；二级：±0.6%~±1.0%；三级：±1.1%~±2.0%；四级：>±2.0%	0.40
可监测性	响应及时性	一级：≤30 秒；二级：31~60 秒；三级：61~180 秒；四级：>180 秒	0.30

为量化评估风险等级，本研究建立了包含可能性严重性可监测性三个一级指标的风险分级指标体系，研究采用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)确定各指标的权重系数。研究依据风险分级的核心逻辑，结合氯碱工艺危险化学品的风险特征，对同一层级指标按其在风险等级判定中的贡献程度进行重要度排序，构建判断矩阵并通过一致性检验后计算得出各二级指标权重。可能性与严重性是风险评估的核心构成维度，直接决定风险等级的判定结果，因此整体权重占比相对更高；可监测性是风险动态管控的技术支撑维度，权重设置匹配现场管控能力水平，各层级指标权重之和均为 1，符合风险评价指标体系的通用构建规范，可保障风险分级结果的科学性与合理性。各级指标内涵与分级标准如表 1 所示。

4.1.3. 风险分级与管控措施

采用风险矩阵法进行风险分级，可能性与严重性分级组合及对应风险等级如表 2 所示，不同等级风险配套差异化管控措施，详情见表 3。

Table 2. Risk matrix classification table
表 2. 风险矩阵分级表

可能性等级	严重性一级	严重性二级	严重性三级	严重性四级
一级	低风险	一般风险	较大风险	重大风险
二级	低风险	一般风险	较大风险	重大风险
三级	低风险	较大风险	较大风险	重大风险
四级	一般风险	较大风险	重大风险	重大风险

Table 3. Control requirements and measures for different risk levels
表 3. 不同风险等级管控要求及措施表

风险等级	管控要求	管控措施	检查频次
重大风险	专项管控专人负责	制定专项方案安装先进监控设备实现联锁控制	每日 1 次
较大风险	明确责任定期检查	制定具体措施优化工艺参数加强设备维护	每周 1 次
一般风险	建立台账日常管理	规范操作流程开展常规维护	每月 1 次
低风险	常态化监控	保持现有措施定期巡检	每季度 1 次

针对电解车间重大风险区域，加强电解槽运行参数监测，安装温度压力双参数监测仪，实现超温超压自动报警与联锁控制。对于罐区重大危险源，按 AQ 3036-2010 标准设置可燃气体、有毒气体监测报警仪，防火堤内每隔 20~30 m 设置一台监测设备，确保覆盖所有泄漏释放源。氢气储罐区设置高高液位监测报警及联锁控制系统，实现异常情况下的自动切断与泄压[8]。

4.2. 隐患排查治理体系构建

4.2.1. 隐患排查内容与频次

隐患排查内容覆盖风险管控措施落实情况、设备设施运行状态、作业环境安全状况、人员操作行为等方面。设备设施排查重点包括电解槽、泵阀、管道、储罐等关键设备的完好性，监测报警仪、安全阀等安全附件的有效性，电气设备的防爆等级符合性[9]。作业环境排查关注通风条件消防设施应急通道等情况；人员操作行为排查聚焦作业人员是否严格遵守安全操作规程。排查频次根据风险等级确定：重大风险区域每日排查一次，较大风险区域每周排查一次，一般风险区域每月排查一次，低风险区域每季度排查一次；同时根据生产负荷变化、季节特点等情况开展专项排查[10]。

4.2.2. 隐患分级与闭环管理

隐患按严重程度划分为重大隐患、较大隐患、一般隐患三个等级。重大隐患需立即停产整改，制定专项整改方案，明确整改责任人、整改措施、整改期限，整改完成后经专家验收合格方可恢复生产。较大隐患需限期整改，整改期限不超过 7 天，整改过程中需采取临时管控措施防止事故发生。一般隐患需在 3 天内完成整改，由车间负责人跟踪落实整改情况。建立隐患排查治理台账实现闭环管理，台账内容包括隐患描述、发现时间、所在区域、风险等级、整改措施、整改责任人、完成时限、复查结果等信息。利用信息化平台实现隐患排查治理全过程记录与追溯，确保隐患整改形成闭环。

4.3. 智能化监控平台搭建

智能化监控平台作为双重预防机制的核心技术支撑，通过“硬件层－传输层－软件层－应用层”四层架构实现全维度风险动态管控。

智能化监控平台的设计以 AQ 3036-2010《危险化学品重大危险源 罐区现场安全监控装置设置规范》为核心技术依据，并参照 GB/T 50493-2019《石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计标准》中关于探测器布点与报警值设定的配套要求。标准向设计参数的转化遵循“条款解析－风险适配－工程量化”的基本路径：首先解析标准中定性或半定量表述所界定的参数区间，如“不宜大于”；其次引入氯碱工艺特定风险条件进行区间缩紧或等价验证；最后将经过风险适配的数值固化为系统组态参数。下文所述报警阈值、监测布点间距及联锁响应时间，都是按此路径由标准条文推导得出。

4.3.1. 平台架构

① 硬件感知层：部署全场景监测终端，按氯碱介质腐蚀、爆炸、有毒特性选型防爆防腐型设备。工艺侧配置电解槽温度压力双参数监测仪、管道流量流速传感器、储罐液位压力变送器；环境侧在罐区防火堤内按 20~30 米间距布设可燃气体与有毒气体检测探头，同步安装风速风向传感器、环境温度监测仪，安全侧配置消防设施状态监测器、应急设备完好性检测器、人员定位基站。

② 数据传输层：构建三芯屏蔽电缆专用网络，兼容 TCP/IP 协议与工业以太网标准，搭配边缘计算节点进行数据预处理。原始数据经降噪滤波、异常剔除后通过加密通道实时上传，传输延迟控制在 1 秒以内。

③ 软件支撑层：集成数据采集引擎、多源数据融合模块、智能预警算法库、联锁控制逻辑单元。数据融合模块采用加权融合算法整合工艺、环境、安全多维度数据；预警算法库嵌入基于历史事故数据训练的复合模型；联锁控制单元预设电解槽超温超压、储罐泄漏等典型场景的应急处置逻辑。

④ 应用服务层：提供可视化监控界面、风险等级自动判定、隐患智能识别、应急联锁控制、数据统计分析等核心功能，采用 B/S 架构支持电脑端、移动端多终端访问。平台整体架构图见图 1。

4.3.2. 核心功能实现路径

动态监测功能：通过硬件感知层实时采集电解槽温度压力、储罐液位温度压力、可燃气体浓度、有毒气体浓度等关键参数，支持参数历史曲线查询与趋势分析。

智能预警功能：各级报警阈值的设定依据 AQ 3036-2010 第 4.3 条“预(报)警值的确定”执行，其中可燃气体、有毒气体及工艺参数报警均按该标准第 4.3.5 条、第 4.3.6 条、第 4.3.1 条的要求至少分为两级，具体取值按前述“风险适配－工程量化”路径推演确定。采用基于历史数据统计分析与多参数加权融合的复合预警模型。预警逻辑分为三级：单参数超出预设阈值触发初级预警；多参数加权融合计算的综合风险值高于设定标准升级预警等级；当前参数组合与历史事故数据匹配度高于 85%触发紧急预警。模型具备自学习能力，可根据实时运行数据动态调整权重系数与阈值标准，预警准确率达 99%以上。

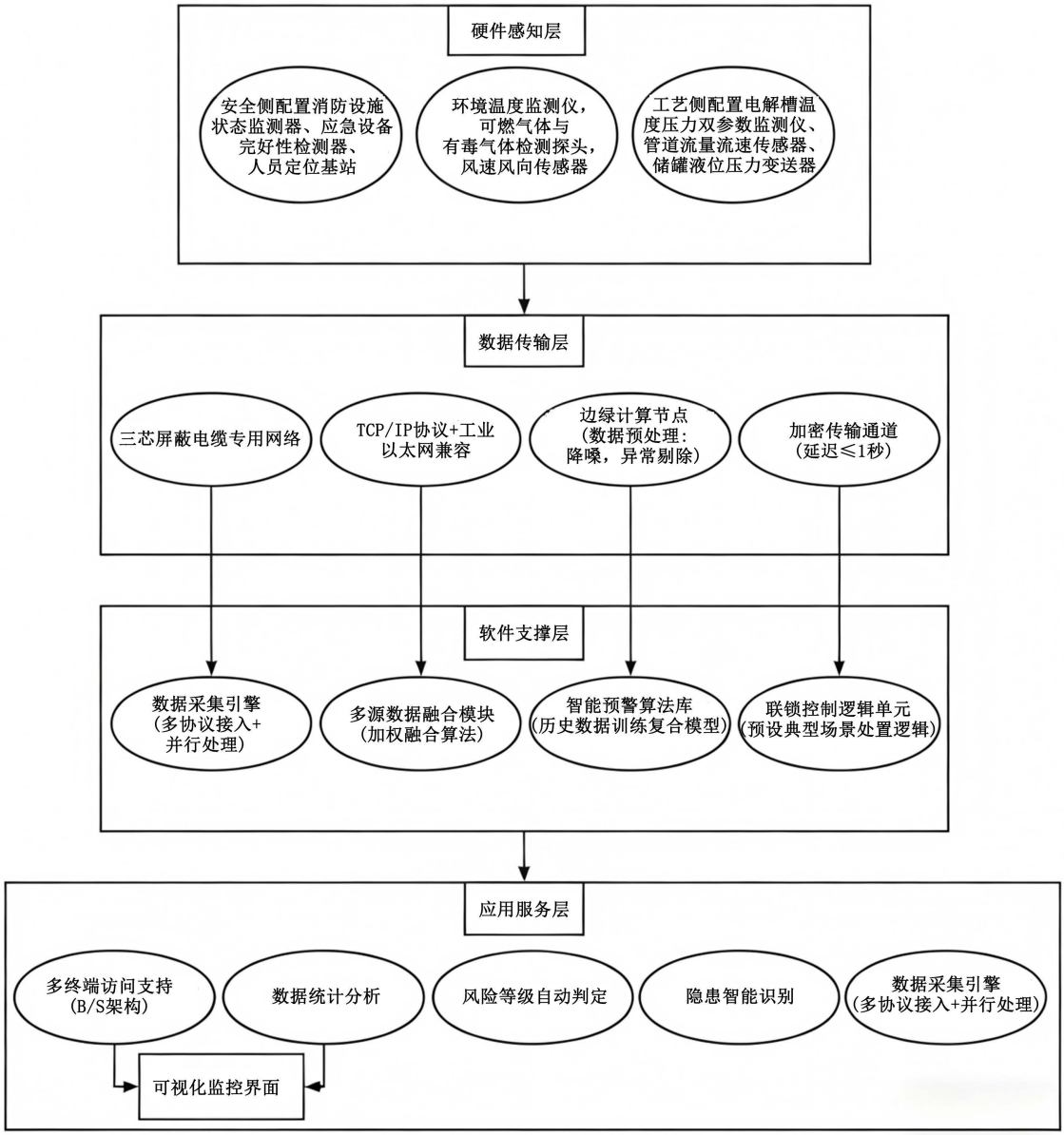

Figure 1. Smart monitoring platform overall architecture diagram
图 1. 智能监控平台整体架构图

应急联锁控制功能：联锁逻辑的设计依据 AQ 3036-2010 第 5 章“联锁控制装备的设置要求”，紧急切断阀与喷淋系统的响应时间分配参照第 7.2.4 条关于联锁系统响应时间的基本要求，结合 HAZOP 泄漏后果模拟确定的 5 秒安全窗口进行工程化分配。预设电解槽超温超压、储罐泄漏、气体浓度超标等典型风险场景的应急处置逻辑。当平台触发紧急预警时，自动启动联锁控制程序，如氯气泄漏时联动开启喷淋吸收系统与通风设备，电解槽超温超压时自动切断进料并启动泄压装置，同时向现场人员发送应急处置指令，实现风险的快速管控。

闭环管理功能：将风险分级管控与隐患排查治理流程嵌入平台，自动识别风险管控薄弱环节并生成隐患排查任务，跟踪记录隐患整改全过程，形成“监测－预警－处置－整改－复查”的闭环管理链条，确保隐患及时消除[11]。

5. 双重预防机制实践应用与效果评估

5.1. 应用场景

为验证所构建双重预防机制的实际效果，本研究选取某大型氯碱企业作为实践对象。该企业位于华北地区，年产烧碱 30 万吨氯气 28 万吨氢气 0.8 万吨，拥有电解车间氯氢处理车间、碱液蒸发车间以及原料产品罐区等主要生产区域，罐区占地面积约 8000 平方米，包含 8 台氯气储罐、6 台氢气储罐、10 台氢氧化钠储罐等重大危险源。改造前，该罐区存在监测点位不足、部分区域存在监测盲区、隐患排查依赖人工效率低下等问题，2022 年曾发生氯气轻微泄漏事故造成 3 人轻伤直接经济损失约 80 万元。

按照本文构建的双重预防机制，企业于 2023 年 3 月启动机制建设，4 月完成全流程风险辨识与风险分级，5 月至 6 月完成隐患排查治理体系优化与智能化监控平台安装调试，7 月正式投入运行，通过为期一年的实践应用系统检验双重预防机制的实际运行效果。如表 4 所示。

Table 4. Basic information of the enterprise in practice and mechanism construction milestones table
表 4. 实践企业基本情况及机制建设时间节点表

项目	具体内容
企业基本概况	华北地区大型氯碱企业，年产烧碱 30 万吨氯气 28 万吨氢气 0.8 万吨，拥有电解车间氯氢处理车间碱液蒸发车间及原料产品罐区等主要生产区域，罐区占地面积约 8000 平方米，包含 8 台氯气储罐 6 台氢气储罐 10 台氢氧化钠储罐等重大危险源
改造前核心问题	监测点位不足部分区域存在监测盲区，隐患排查依赖人工效率低下，2022 年发生氯气轻微泄漏事故造成 3 人轻伤，直接经济损失约 80 万元
机制建设时间节点	2023 年 3 月启动机制建设，4 月完成全流程风险辨识与风险分级，5 月至 6 月完成隐患排查治理体系优化与智能化监控平台安装调试，7 月正式投入运行，开展为期一年的实践应用验证

5.2. 应用效果评估

5.2.1. 风险管控效果

风险辨识覆盖率从原来的 85%提升至 100%，共辨识出重大风险点 12 个，较大风险点 35 个，一般风险点 86 个，低风险点 128 个，所有风险点均制定针对性管控措施。重大风险点管控措施落实率达 100%，通过安装智能化监控设备实现 24 小时动态监测，未发生重大风险失控情况。

企业生产过程中风险预警响应时间从原来的 30 分钟缩短至 5 分钟以内，异常情况处置效率显著提升。电解车间电解槽超温超压预警准确率达 99%，罐区可燃气体有毒气体泄漏监测响应及时率达 100%，2023 年 8 月罐区 1 号氯气储罐出现微量泄漏，平台 3 秒内触发报警并自动启动喷淋系统，现场人员 5 分钟内完成应急处置未造成人员伤亡与环境影响，有效防范了重大事故发生。

5.2.2. 隐患治理效果

隐患排查效率提升 40%，隐患发现数量较之前增加 35%，其中一般隐患占比下降 20%，重大隐患零发生。隐患整改完成率从原来的 82%提升至 98%以上，整改复查通过率达 100%，实现隐患闭环管理。

通过常态化隐患排查治理，设备完好率从原来的 90%提升至 98%，人员操作合规率从 88%提升至 97%，车间作业环境达标率达 100%。企业安全生产标准化水平显著提升，顺利通过安全生产标准化一级企业复审。设备故障次数从每月平均 6 次降至 1 次，员工违规操作事件从每月 4 起降至 0 起，罐区监测数据准确率从 92%提升至 99.5%。

5.2.3. 经济效益与社会效益

实践应用期间企业未发生一般及以上安全生产事故，基于该企业机制建设前三年安全类直接经济损

失的年均水平测算，损失构成涵盖事故停产减产损失、设备损坏维修费用、危险物料泄漏损耗、人员伤亡医疗及相关处罚支出，其中停产减产损失占比约 60%，设备维修与物料泄漏损失占比约 30%，人员医疗与相关处罚支出占比约 10%，整体损失规模符合氯碱行业同规模企业的公开统计区间。机制运行后重大风险受控，设备故障频次大幅下降，减少直接经济损失约 500 万元。

通过提升生产效率、优化风险管控措施，增加经济效益约 800 万元。项目效益由三部分构成，测算基础结合企业生产运行数据与氯碱行业公开经济技术参数。第一部分为生产效率提升带来的产能增益，生产效率提升 8%对应年产量增量约 2.4 万吨烧碱，扣除可变成本后年新增收益约 480 万元，占比 60%，源自设备运行稳定性提升与非计划停机时间压缩。第二部分为能源与原材料消耗节约，电解系统电耗、蒸汽消耗以及原盐损耗均得到管控，年节约成本约 200 万元，占比 25%，源自工艺参数优化与泄漏损耗管控。第三部分为运维成本节约，设备故障率降低减少维修备件投入与停机损失，年节约运维成本约 120 万元，占比 15%，源自常态化隐患排查与设备状态管控。

企业安全生产形势持续稳定，员工安全意识显著增强，周边环境安全得到有效保障，获得当地政府与行业主管部门的认可。该机制的成功应用为行业内其他企业提供了可复制的实践经验，推动氯碱行业安全管理水平整体提升。

6. 结论

本研究聚焦氯碱工艺介质高危险性、工艺强复杂性、风险高关联性的核心特征，紧扣罐区重大危险源管控核心痛点，基于 AQ 3036-2010 标准规范与双重预防机制核心要求，构建了专项适配氯碱行业的全流程安全管控体系。实践表明，该机制在风险辨识覆盖率、重大风险管控覆盖率、隐患整改完成率等关键指标上均取得显著成效，电解槽超温超压预警准确率达 99%，罐区泄漏监测响应及时率达 100%；设备完好率从 90%提升至 98%，人员操作合规率从 88%提升至 97%，生产效率提升 8%，年新增经济效益约 800 万元，同时杜绝一般及以上安全生产事故。该机制有效实现了氯碱工艺危险化学品的风险分级管控与隐患排查治理闭环管理。

本研究仍存在一定的局限性。实践对象集中于单家大型氯碱企业，其在中小型氯碱企业的适配性尚未经过充分验证；预警模型构建依赖有限历史运行数据与事故案例，对极端气候设备突发故障等非常规工况下的参数关联预测精度不足；智能化平台的 AI 算法应用处于基础阶段，尚未实现风险的预测性管控与自适应调整。

未来研究可从三方面重点推进：一是扩大实践覆盖范围，选取不同规模不同工艺布局的氯碱企业开展多场景验证，提升机制的普适性；二是深化智能算法应用，引入机器学习与深度学习技术，整合多源异构数据构建预测性预警模型，提高非常规工况下的预测准确性；三是拓展应用场景边界，推动该机制与氯碱工艺全流程数字化管理系统、工业互联网平台深度融合，为高危化工行业安全管理数字化转型提供更广泛的技术支撑。

参考文献

[1] 吴昊东, 白永辉. 危险化学品企业安全风险及预防措施[J]. 化工管理, 2025(2): 105-109.

[2] Zhang, L., Wang, H. and Chen, Q. (2023) Risk Assessment of Chlorine Leakage Based on Bayesian Network in Chlor-Alkali Plants. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **81**, Article ID: 104956.

[3] 王浩, 孙青松, 厉建祥, 等. 危险化学品企业双重预防机制数字化建设研究[J]. 安全、健康和环境, 2024, 24(3): 21-26.

[4] 祝成斌. 石油化工企业安全管理与双重预防机制的思考[J]. 化工管理, 2024(6): 127-130.

[5] 国家安全生产监督管理总局. AQ 3036-2010 危险化学品重大危险源 罐区现场安全监控装置设置规范[S]. 北京:

煤炭工业出版社, 2010.
[6] 吉步强. 化工安全管理中双重预防机制的应用研究[J]. 化工管理, 2025(27): 86-89.
[7] 祝成斌. 危险化学品企业工艺安全管理关键要素[J]. 内蒙古石油化工, 2024, 50(3): 53-55+67.
[8] 王陆军. 液氯槽车装卸工艺改进及安全提升[J]. 中国氯碱, 2024(1): 53-57.
[9] 刘龙飞. 危险化学品企业双重预防体系建设过程中存在的问题与对策[J]. 化学工程与装备, 2023(1): 250-252.
[10] 乔志平, 孙龙彬, 惠建伟, 等. 氯碱化工系统消缺期间动火作业安全管控实践[J]. 中国氯碱, 2024(3): 40-43.
[11] 张胜男. 智能化平台升级改造在氯碱生产中的应用[J]. 中国氯碱, 2023(9): 33-36+64.