

智慧化工生产安全管控系统在煤化工企业的应用

马志忠

久泰能源(准格尔)有限公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘要:煤化工产业作为我国能源战略的重要支柱,其生产过程具有高温、高压、易燃、易爆、有毒有害等高危特性,安全风险始终是制约行业高质量发展的核心瓶颈。传统的安全管理模式依赖人工巡检与经验判断,存在响应滞后、覆盖不全、预警不足等固有缺陷。随着物联网(IoT)、大数据、人工智能(AI)、数字孪生(DigitalTwin)等新一代信息技术的迅猛发展,构建并应用智慧化工生产安全管控系统已成为提升煤化工企业本质安全水平的必然选择。本文深入剖析了煤化工企业面临的主要安全风险与挑战,系统阐述了智慧化工生产安全管控系统的核心架构、关键技术及其功能模块,并结合典型应用场景,详细论述了该系统在风险智能感知、隐患闭环治理、应急科学决策及人员行为规范等方面的具体应用。研究表明,智慧安全管控系统通过实现对生产全流程、全要素、全天候的数字化、网络化与智能化管理,能够显著提升企业的风险预知、预警、预控能力,为煤化工行业的安全、绿色、高效发展提供了坚实的技术支撑与保障。

关键词:智慧化工;安全管控;煤化工;物联网;人工智能;数字孪生

引言

在全球能源结构转型与“双碳”目标下,煤炭清洁高效利用成为我国能源安全战略基石,煤化工产业迎来新机遇。现代煤化工项目规模大、工艺复杂、自动化程度高,但生产原料和中间产物多具高度危险性,反应条件苛刻,生产链路潜藏巨大安全风险,江苏响水“3·21”爆炸等事故警示安全生产是企业红线。长期以来,煤化工企业采用“人防+物防”模式,面对复杂生产系统暴露诸多痛点:各子系统数据独立,信息孤岛现象严重,难形成统一风险视图;风险感知能力弱,无法实时精准捕捉微小隐患;应急响应依赖经验,缺乏数据驱动的科学决策支持,易错失最佳处置时机;人员不安全行为监管困难,违章操作难杜绝。第四次工业革命浪潮下,以人工智能等为代表的新技术为破解难题提供新路径,智慧化工生产安全管控系统应运而生。它集成感知、分析等为一体,构建立体化防控网络,实现根本性转变。研究推广其在煤化工企业应用,对提升行业安全治理能力和现代化水平意义重大。

1 煤化工企业安全风险特征与挑战

要有效构建智慧安全管控系统,首先必须深刻理解煤化工企业独特的安全风险画像。其主要特征与挑战体现在以下几个方面:

1.1 工艺过程的高危性与复杂性

煤化工的核心工艺,如煤气化、变换、净化、合成等,普遍在高温($>1000^{\circ}\text{C}$)、高压($>4\text{MPa}$)下进行。例如,煤气化炉内煤粉与氧气剧烈反应,一旦控制失当,

极易引发炉膛爆炸或超温烧穿。合成氨、甲醇等工艺涉及大量氢气,其爆炸极限宽(4%-75%),点火能量极低,微量泄漏即可酿成灾难。此外,工艺流程长、单元多、物料交互频繁,一个环节的故障可能通过连锁效应迅速波及其他装置,形成系统性风险。

1.2 危险物料的多样性与危害性

煤化工生产涉及数十种乃至上百种危险化学品。除了常见的易燃易爆气体($\text{H}_2, \text{CH}_4, \text{CO}$)外,还包含剧毒物质(如 HCN 、 H_2S 、 NH_3)和强腐蚀性介质(如浓硫酸、烧碱)。这些物料一旦发生大规模泄漏,不仅会造成严重的火灾爆炸事故,还会导致大范围的人员中毒和环境污染^[1]。特别是硫化氢,无色、有臭鸡蛋味,但高浓度下会迅速麻痹嗅觉神经,使人丧失警觉,极具隐蔽性和致命性。

1.3 设备设施的老化与失效风险

煤化工装置常年在苛刻工况下运行,设备承受着热应力、腐蚀、冲刷等多重损伤,极易出现疲劳裂纹、壁厚减薄、密封失效等问题。传统的人工定期检验(如超声波测厚)存在周期长、覆盖面有限的缺点,难以及时发现设备内部的早期损伤。一旦关键承压设备(如反应器、换热器)发生突发性破裂,后果不堪设想。

1.4 人员行为的不确定性

尽管自动化水平不断提高,但人的因素仍是安全管理中最不可控的一环。操作人员的误操作、维修人员的违章作业、承包商管理的疏漏等,都是引发事故的重要诱因。尤其是在开停车、检修等非稳态工况下,人为失

误的概率显著增加。如何有效规范和约束人员行为，是安全管理的一大难题。

1.5 应急处置的时效性与协同性挑战

事故发生后，黄金救援时间极为短暂。传统的应急指挥依赖于对讲机、电话等通信工具，信息传递慢、指令下达不精准，且各部门（生产、消防、医疗、环保）之间协同效率低下。缺乏对事故态势的实时模拟推演和最优处置方案的智能推荐，往往导致应急响应迟缓、资源调配不当，从而扩大事故后果。

综上所述，煤化工企业的安全风险呈现出“点多、线长、面广、体大”的立体化、系统化特征。这要求安全管控体系必须具备全域感知、智能分析、快速联动和科学决策的能力，而这正是智慧化工生产安全管控系统的核心价值所在。

2 智慧化工生产安全管控系统的核心架构与关键技术

智慧化工生产安全管控系统是一个复杂的综合性工程，其成功构建依赖于清晰的顶层设计和一系列前沿技术的深度融合。

2.1 系统总体架构

典型的智慧安全管控系统采用“云-边-端”协同的三层架构：

2.1.1 感知层（端）

这是系统的“感官”。通过部署海量、多类型的智能传感器（如无线压力/温度/液位变送器、激光气体分析仪、红外热像仪、高清视频摄像头、人员定位信标、设备振动传感器等），对生产现场的人、机、料、法、环等全要素进行7x24小时不间断的数据采集。5G和工业PON（无源光网络）技术为海量数据的高速、低延时回传提供了网络基础。

2.1.2 边缘计算层（边）

这是系统的“初级大脑”。在靠近数据源的装置区或车间部署边缘计算网关或服务器，对原始数据进行初步的清洗、过滤、压缩和本地化实时分析。例如，对视频流进行AI算法识别，实时发现人员未戴安全帽、闯入禁区等行为；对设备振动信号进行频谱分析，判断轴承是否异常^[2]。边缘计算有效减轻了云端负担，并确保了关键告警的毫秒级响应。

2.1.3 平台与应用层（云）

这是系统的“智慧中枢”。在企业私有云或混合云上构建统一的安全管控平台，集成数据中台、AI算法引擎、数字孪生引擎、业务应用等核心模块。数据中台负责汇聚来自DCS、SIS、GDS、ERP、EAM（设备资产管理系统）等所有相关系统的数据，打破信息孤岛，形成统一

的数据湖。在此基础上，通过AI模型进行深度挖掘与预测分析，并通过数字孪生技术将物理工厂在虚拟空间中完整映射，实现可视化、可模拟、可推演的智能管控。

2.2 关键支撑技术

（1）物联网（IoT）与泛在感知技术：实现对物理世界的全面数字化。高精度、高可靠性的传感器是基础，而LPWAN（低功耗广域网）等技术则解决了在复杂工业环境中大规模部署传感器的供电与通信难题。（2）大数据与数据融合技术：面对PB级的多源异构数据，需要强大的数据治理能力。通过ETL（抽取、转换、加载）工具、数据标签体系和主数据管理，将不同格式、不同频率的数据进行标准化处理，为上层应用提供高质量的数据服务。（3）人工智能（AI）与机器学习（ML）：这是系统智能化的灵魂。具体应用包括：一是计算机视觉（CV）：用于智能视频分析，自动识别烟火、泄漏、人员违规行为等。二是深度学习（DL）：构建LSTM（长短期记忆网络）等时序模型，对设备运行参数进行趋势预测，实现故障早期预警。三是知识图谱（KG）：将工艺规程、设备台账、历史事故案例、法规标准等非结构化知识构建成关联网络，为智能诊断和应急决策提供知识支撑。（4）数字孪生（DigitalTwin）技术：通过建立高保真的三维可视化模型，并与实时数据动态绑定，管理者可以在虚拟空间中“透视”整个工厂的运行状态。更重要的是，可以基于该模型进行事故场景的仿真推演，评估不同应急预案的效果，从而优化应急策略。（5）地理信息系统（GIS）与人员定位技术：UWB（超宽带）或蓝牙AoA（到达角）等高精度定位技术，结合GIS地图，可以实时掌握厂区内所有人员的位置、行动轨迹和生命体征（通过智能手环），在紧急疏散时实现精准引导和人员清点。

3 智慧安全管控系统的核心功能模块

基于上述架构与技术，智慧安全管控系统通常包含以下核心功能模块：

3.1 全域风险智能感知与监测

该模块整合了GDS、视频监控、设备在线监测等所有感知数据，在三维地图上直观展示全厂风险分布。系统不仅能实时显示当前的气体浓度、温度、压力等数值，还能通过AI算法对数据进行关联分析。例如，当某区域同时出现微小的CO浓度上升、管道壁温异常和轻微的异响（通过声学传感器捕捉）时，系统可综合判断为潜在的管道泄漏风险，并自动提升告警级别，远早于单一指标超标。

3.2 隐患排查与闭环治理

系统建立了标准化的隐患排查流程。员工可通过移

动APP随时上报发现的隐患,附带照片和位置信息。系统根据隐患类型、位置、风险等级自动派发给责任部门,并设定整改时限。整改完成后,需上传验证照片,由安全管理人员线上验收。整个过程形成“上报-派发-整改-验收-归档”的PDCA闭环,确保隐患件件有落实、事事有回音^[3]。同时,系统会对隐患数据进行统计分析,识别出高频次、高风险的“问题区域”或“问题设备”,为管理层的精准投入和预防性维护提供依据。

3.3 重大危险源智能预警与管控

针对罐区、气化炉等重大危险源,系统实施重点监控。通过接入SIS系统的连锁状态、储罐的液位/压力/温度等关键参数,结合气象数据(如雷电、大风预警),运用风险矩阵模型进行动态风险评估。一旦风险值超过阈值,系统会自动触发分级预警(黄、橙、红),并通过声光报警、短信、APP推送等多种方式通知相关人员。对于红色预警,系统甚至可以自动启动部分预设的应急程序,如关闭相关阀门、启动喷淋系统等。

3.4 人员行为智能识别与管控

利用遍布厂区的AI摄像头,系统可7x24小时自动识别多种不安全行为,如未佩戴安全帽/安全带、在禁烟区吸烟、翻越警戒线、睡岗等。一旦识别到违规行为,系统会立即在监控中心弹窗告警,并可联动现场的语音广播进行即时提醒。所有违规记录都将被存档,作为安全绩效考核和培训教育的重要依据,从而有效震慑和纠正不安全行为。

3.5 智能应急指挥与辅助决策

这是系统在关键时刻发挥价值的核心模块。当事故发生时,系统能自动或手动启动应急预案。基于数字孪生模型,指挥中心可以:(1)实时态势感知:在三维地图上叠加显示事故点、泄漏扩散模拟、受影响人员位置、周边消防水源、应急物资库等关键信息。(2)智能方案推演:根据事故类型、规模、气象条件等,利用内置的应急知识图谱和仿真模型,自动生成多个处置方案,并评估每个方案的成功率、所需资源和潜在次生风险^[4]。(3)一键调度指挥:指挥员选定最优方案后,可一键向相关应急小组(消防、抢险、医疗)下达精确指令,并通过单兵装备

实时跟踪任务执行进度,实现扁平化、高效的应急指挥。

4 面临的挑战

然而,智慧安全建设并非一蹴而就。未来,该领域仍面临一些挑战:(1)数据安全与系统韧性:随着系统对网络的依赖加深,如何防范网络攻击、确保系统在极端情况下的稳定运行,是必须解决的关键问题。(2)AI模型的可解释性与可靠性:“黑箱”式的AI决策有时难以获得操作人员的信任。未来需要发展更具可解释性的AI模型,并建立严格的模型验证与更新机制。(3)标准与生态建设:目前行业内缺乏统一的数据接口和系统集成标准,导致不同厂商的系统难以互联互通。推动建立开放、兼容的产业生态至关重要。

结语

智慧化工生产安全管控系统代表了煤化工企业安全管理的发展方向,它深度融合新一代信息技术,构建现代化安全治理体系,从根本上提升企业本质安全水平,在风险智能感知、隐患闭环治理、应急科学决策等方面优势显著。不过,智慧安全建设并非一蹴而就,未来仍面临诸多挑战与发展方向,如数据安全与系统韧性方面,要防范网络攻击、确保系统稳定运行;AI模型需更具可解释性,并建立严格验证与更新机制;行业内缺乏统一标准,推动建立开放兼容的产业生态至关重要。展望未来,随着技术迭代与应用深化,智慧化工生产安全管控系统将更加成熟、智能、自主,成为企业安全生产的“守护神”和化工行业高质量发展的核心引擎,企业应积极投入,将智慧安全融入企业文化与运营,为建设一流煤化工企业筑牢根基。

参考文献

- [1]王宇,高宇龙.智慧化工生产安全管控系统在煤化工企业的应用[J].科技与创新,2026,(01):215-217+221.
- [2]杨乐.煤化工智慧工厂建设方案研究[J].化肥设计,2026,64(01):45-48.
- [3]张国梁.煤化工安全生产监察能力评估研究[J].能源科技,2025,23(05):9-13.
- [4]王琛.煤化工企业安全风险预控管理体系建立的研究[J].化工安全与环境,2023,36(07):92-96.