

# 数字化技术在煤化工行业安全管理中的应用

许大伟

河南鑫泰能源有限公司 河南 安阳 455133

**摘要：**煤化工行业因其高温、高压、易燃、易爆的工艺特性，长期面临安全风险高、事故后果严重的挑战。随着数字化技术的快速发展，物联网、大数据、人工智能、5G通信等创新技术正深度融入煤化工安全管理领域，推动传统安全管理模式向智能化、主动化转型。本文通过分析煤化工行业安全管理的核心痛点，结合国内外典型企业实践案例，系统探讨数字化技术在风险感知、智能预警、应急响应、管理决策等环节的应用路径，提出以数据驱动为核心的安全管理体系构建框架，为行业数字化转型提供理论支撑与实践参考。

**关键词：**煤化工；数字化技术；安全管理；智能预警；风险感知

## 1 引言

### 1.1 研究背景与意义

全球能源结构转型中，煤化工行业肩负煤炭清洁高效利用重任，但其高风险对安全管理要求更高。传统管理模式有三大短板：数据孤岛严重，DCS、SIS等系统独立运行难互通；风险感知不足，人工巡检覆盖率低，隐蔽性风险难早发现；决策支持薄弱，依赖经验规则，缺数据驱动的动态评估模型。数字化技术可实现安全管理“三个转变”：被动响应转主动预防、经验驱动转数据驱动、局部管控转系统治理。

### 1.2 国内外研究现状

IEA 2024年报告显示，全球领先煤化工企业已将数字化技术用于安全管理核心环节，如德国巴斯夫部署工业互联网平台，提升设备故障预测准确率、减少非计划停机；美国陶氏化学用数字孪生技术优化应急预案。国内《煤炭工业“十四五”数字化转型规划》提出“以数字化赋能安全生产”目标，山西焦煤集团等企业试点取得进展，但行业整体存在技术应用碎片化等问题，需系统研究。

## 2 煤化工行业安全管理核心痛点分析

### 2.1 工艺安全风险特征

煤化工生产涉及煤气化、液化、合成等复杂工艺，其安全风险呈现以下特征：（1）多因素耦合性：温度、压力、物料浓度等参数的动态变化可能引发连锁反应。例如，甲醇合成装置中，CO分压超过临界值可能导致催化剂中毒，同时引发反应器超温风险；（2）隐蔽性风险突出：管道内壁腐蚀、设备疲劳裂纹等隐蔽性缺陷难以通过常规检测发现；（3）事故后果严重性：泄漏的易燃易爆气体可能形成爆炸性混合物，导致灾难性后果。

### 2.2 传统管理模式局限性

一是风险感知滞后：人工巡检频率低（通常每日1-2次），难以捕捉瞬态风险。例如，某企业回采工作面甲烷浓度动态变化周期仅15秒，人工记录无法实时跟踪；二是预警机制粗放：传统阈值报警系统缺乏对多参数关联性的分析，误报率高达30%以上；三是应急响应低效：事故发生后，指挥人员需依赖经验判断事故类型、影响范围，决策时间长达15-30分钟，错失最佳处置窗口。

## 3 数字化技术在煤化工安全管理中的应用场景

### 3.1 物联网（IoT）与智能传感技术：构建全要素感知网络

物联网和智能传感技术是数字化技术在煤化工安全管理中的基础应用。通过在煤化工生产现场部署大量的智能传感设备，如气体探测器、震动测量仪、红外热成像仪等，可以构建覆盖“人-机-环-管”四维的监测网络，实现对生产过程的全要素实时感知。

在气体监测方面，采用电化学传感器与激光光谱技术相结合的方式，能够实现对甲烷、CO、H<sub>2</sub>S等气体浓度的实时监测，检测精度可达ppm级<sup>[1]</sup>。这些传感器可以安装在生产装置的关键部位，如反应器、管道连接处等，一旦气体浓度超过安全阈值，立即发出报警信号，提醒操作人员采取相应措施。

设备状态监测是保障煤化工生产安全的重要环节。在压缩机、泵等关键设备上安装振动传感器，通过频谱分析技术可以识别设备故障特征。例如，当轴承磨损时，振动信号的频率成分会发生变化，通过分析这些变化可以提前发现轴承磨损问题，及时进行维修或更换，避免设备故障引发事故。

环境感知也是物联网技术应用的重要方面。利用温湿度传感器、烟雾探测器等设备可以监控生产区域的环境状态。同时，结合AI图像识别技术，可以对人员的行

为进行实时监测，检测人员是否佩戴安全帽、是否进入危险区域等违规行为。一旦发现违规行为，系统立即发出警报，并通过现场广播或手机短信等方式通知相关人员，及时纠正违规行为，保障人员安全。

### 3.2 大数据与人工智能：实现风险智能预警

大数据和人工智能技术为煤化工安全风险预警提供了强大的支持。首先，需要建设数据中台，整合DCS、SIS、设备监测、巡检记录等多源数据，构建统一的数据湖。通过边缘计算节点对原始数据进行清洗、标注等预处理，减少数据传输延迟，提高数据处理效率。

基于大数据和人工智能算法，可以构建风险预测模型。应用LSTM（长短期记忆网络）、Transformer等深度学习算法，分析历史事故数据与实时监测信号的关联性。例如，某企业通过对大量历史数据的学习和分析，建立了煤层特性、机械磨损值、涌水量等参数与岩层冒顶之间的关联模型<sup>[2]</sup>。利用该模型，可以提前21小时准确预报岩层冒顶征兆，为采取支护措施提供了充足的时间，有效避免了冒顶事故的发生。

知识图谱技术在煤化工安全管理中也具有重要应用价值。构建“设备 - 工艺 - 风险”关联知识库，将设备信息、工艺参数和风险类型进行关联存储。当压缩机振动超标时，系统可以自动在知识库中检索相关案例，分析可能的故障原因，如润滑油不足、转子结垢等，并推荐相应的处置方案。这有助于操作人员快速定位故障根源，采取有效的解决措施，提高故障处理效率。

### 3.3 数字孪生与虚拟仿真：优化应急响应能力

数字孪生和虚拟仿真技术为煤化工应急响应能力的提升提供了创新手段。利用激光扫描、BIM（建筑信息模型）技术构建“地下一公里”数字孪生体，能够精确标注采空区、地层裂隙带、老窑水体等风险源位置。中煤能源项目通过试点应用数字孪生技术，对地下地质结构进行了详细建模和分析，使断层带塌方发生率降低60%以上。通过对数字孪生体的实时更新和监测，可以及时发现地质结构的变化，提前采取防范措施，避免塌方等事故的发生。

基于数字孪生体可以模拟火灾、爆炸、泄漏等事故场景，优化应急预案。通过设定不同的事故参数，如泄漏量、火灾规模等，模拟事故的发展过程和影响范围，评估不同应急预案的效果。根据模拟结果，对应急预案进行优化和完善，提高应急预案的科学性和实用性。例如，某企业通过仿真分析确定了最佳通风方案，在发生火灾时，能够迅速排出烟雾和有毒气体，为人员疏散和灭火救援创造有利条件，将有毒气体扩散时间缩短40%。

AR/VR技术在应急培训中也发挥着重要作用。利用虚拟现实技术开展应急演练，可以为员工提供逼真的事故场景体验，让员工在虚拟环境中进行应急操作和处置训练。研究显示，VR培训可使员工应急响应时间缩短35%，操作错误率降低50%。通过反复的虚拟演练，员工能够熟悉应急流程和操作方法，提高应对突发事故的能力和心理素质。

### 3.4 5G与工业互联网：支撑实时决策与协同

5G和工业互联网技术为煤化工安全管理的实时决策和协同提供了高速、稳定的通信保障。5G网络具有高速率、低时延、大容量的特点，能够支持井下设备与地面控制中心的毫秒级数据交互，实现远程操控与实时干预<sup>[3]</sup>。河北某企业构建了“地空一体灾害快速响应体系”，通过5G + 高清摄像头实现井下地面实时联络。在井下发生灾害时，地面指挥中心可以实时获取井下情况，及时下达指挥指令，指导井下人员进行疏散和救援，应急指挥效率提升60%。

工业互联网平台是煤化工数字化安全管理的核心载体。通过集成设备管理、生产调度、安全监控等功能模块，工业互联网平台打破了信息孤岛，实现了数据的互通与业务的协同。山西焦煤集团打造的工业互联网平台，连接了下属20余座煤矿的生产设备和系统，实现了设备感知数据联网上传。通过对这些数据的分析和处理，可以实时掌握设备运行状态和生产情况，及时发现安全隐患并进行预警。同时，平台还支持应急指挥和决策，实现了应急资源的智能调度和远程协同，提高了应急响应效率。

移动应用集成也是数字化安全管理的重要趋势。开发安全巡检APP、隐患上报小程序等移动端工具，实现了“巡检 - 上报 - 整改 - 验收”全流程线上化管理。新疆煤化工企业通过钉钉平台构建动态监督总台账，巡检人员可以通过手机APP实时上传巡检数据和隐患信息，相关负责人可以及时进行审核和处理。计划执行偏差率下降40%，提高了安全管理的效率和透明度。

## 4 煤化工企业数字化安全管理实施路径

### 4.1 顶层设计与标准制定

（1）构建“1+N”体系：以工业互联网平台为核心，整合N个业务系统（如设备管理、生产调度、安全监控），实现数据互通与业务协同；（2）制定数据治理规范：明确数据采集频率、存储周期、共享规则，建立“一数一源”管理机制。例如，河南煤气公司通过数据中台实现200余项生产经营数据实时切换，数据自动化采集率达95%；（3）完善安全管理制度：将数字化要求纳

入安全生产责任制、操作规程等文件，明确各部门数据维护、系统运维职责。

#### 4.2 分阶段实施策略

(1) 试点探索阶段：选择1-2个生产装置或矿井开展试点，验证技术可行性。例如，潞安化工集团在余吾煤业选煤厂引入清仓机器人，降低人工清仓风险；(2) 规模推广阶段：在试点成功基础上，逐步扩展至全厂/全矿，构建覆盖生产、设备、安全、能源等领域的数字化管理体系<sup>[4]</sup>。山西焦煤集团通过工业互联网平台连接下属20余座煤矿，实现设备感知数据联网上传；(3) 持续优化阶段：基于运行数据迭代优化模型算法，提升系统智能化水平。例如，某企业每季度更新风险预测模型参数，使冒顶预报准确率从82%提升至91%。

#### 4.3 配套保障措施

(1) 组织变革：设立数字化转型办公室，统筹协调技术、业务、IT部门资源；建立“数据官”制度，明确数据管理责任主体；(2) 人才培养：开展数字化技能培训，提升员工数据分析、系统操作能力。河南煤气公司通过“智能化+人力管控”模式，减少人员配置15%，年节约人工成本超1500万元；(3) 安全防护：部署工业防火墙、入侵检测系统等安全设备，防范网络攻击；建立数据备份与恢复机制，确保系统可用性。

### 5 挑战与对策

#### 5.1 技术融合挑战

DCS、SIS、ERP等系统协议不兼容，需通过中间件或API接口实现数据互通；煤化工工艺复杂，需开发行业专属算法模型。例如，针对煤制油装置，需优化催化剂活性预测模型以适应高温高压环境。

对策：采用微服务架构构建灵活可扩展的平台，支持第三方系统快速接入；与高校、科研机构合作开展联合攻关，提升算法行业适配性。

#### 5.2 管理变革挑战

员工对新技术接受度低，需通过培训、考核等方式

推动观念转变；数字化要求打破传统部门壁垒，需重新设计业务流程。例如，隐患排查治理需安全、生产、设备部门协同，易因职责不清导致推诿。

对策：建立“试点-反馈-优化”机制，通过小范围成功案例证明技术价值；制定数字化管理流程手册，明确各部门职责与协作规则。

#### 5.3 投资回报挑战

智能传感设备、工业互联网平台等建设成本较高，中小企业难以承担；安全管理数字化效益多体现为事故率降低、隐患发现提前等间接指标，难以直接关联经济效益。

对策：采用“分步投资、滚动开发”模式，优先实施高回报率项目（如设备预测性维护）；建立数字化效益评估模型，量化安全投入与事故损失、生产效率提升的关系。

#### 结语

数字化技术为煤化工行业安全管理带来革命性变革，构建“感知-分析-决策-执行”闭环体系，大幅提升风险防控与应急响应能力。展望未来，随着5G、AI等技术成熟，煤化工安全管理将向全要素智能化、自主决策系统、生态协同治理等趋势发展。煤化工企业应抓住数字化转型契机，以技术创新推动安全管理升级，筑牢行业高质量发展安全根基。

#### 参考文献

- [1] 刘鹏飞,杨立业.信息化背景下煤化工的安全管理工作[J].化工管理,2021,(05):99-100.
- [2] 张风江.煤化工企业安全风险评估体系构建与优化研究[J].化工管理,2025,(19):97-100.
- [3] 孔建华.智能巡检定位系统在煤化工安全生产管理中的应用[J].甘肃科技,2025,41(04):74-77.
- [4] 刘宝峰.面向煤化工安全生产管理的AI算法研究[J].中国安全生产,2023,18(09):62-63.