

化工过程本质安全化设计与控制策略研究

凌克强

广东 清远 511500

DOI:10.61369/ME.2025110038

摘要：化工过程本质安全化设计与控制策略研究意义重大。本质安全化设计从根源降低风险，全生命周期安全管理贯穿各阶段。设备完整性设计、工艺参数安全边际优化等多种方法，以及智能化监测、评估模型、系统设计等策略，共同构建安全防线，未来数字化、智能化技术将推动行业迈向本质安全。

关键词：化工过程；本质安全化设计；智能化控制策略

Research on Intrinsic Safety Design and Control Strategies for Chemical Processes

Ling Keqiang

Qingyuan, Guangdong 511500

Abstract : The research on the intrinsic safety design and control strategy of chemical processes is of great significance. Inherent safety design reduces risks from the root, and full lifecycle safety management runs through all stages. Various methods such as equipment integrity design, process parameter safety margin optimization, as well as strategies such as intelligent monitoring, evaluation models, and system design, jointly build a safety defense line. In the future, digital and intelligent technologies will drive the industry towards intrinsic safety.

Keywords : chemical process; inherent safety design; intelligent control strategy

引言

2022 年颁布的《“十四五”化工行业高质量发展指南》着重强调提升化工行业本质安全水平。化工过程本质安全化设计与控制策略研究意义重大，其旨在从根源降低或消除潜在风险。本质安全化设计围绕源头风险消除与被动安全特性强化展开，全生命周期安全管理理论框架贯穿化工各阶段。设备完整性设计、工艺参数安全边际优化等多种方法共同构建安全防线。在此背景下，各项策略与技术的融合发展，将推动化工行业朝着本质安全方向迈进，契合政策对行业安全与可持续发展的要求。

一、化工过程本质安全化设计理论基础

(一) 本质安全化设计的基本概念与原则

本质安全化设计旨在从根源上降低或消除化工过程中的潜在风险，使系统在正常运行及误操作、故障等异常情况下，仍能保持安全状态。其核心原则围绕源头风险消除与被动安全特性强化展开。源头风险消除意在从设计初始阶段，便识别并规避危险物质、危险工艺，尽可能选用无毒、无害或低毒、低害的原料，采用较为温和的反应条件，从根本上减少风险源^[1]。被动安全特性强化强调利用物质或系统自身固有属性实现安全保障，比如利用设备自身材质的防火、防爆性能，而不是依赖额外的主动安全措施。通过这些原则，本质安全化设计为化工过程构建起一道基础且坚实的安全防线，有效降低事故发生概率及可能造成的后果。

(二) 全生命周期安全管理理论框架

全生命周期安全管理理论框架将化工过程视为一个整体，从

工艺开发、工程设计到生产运营各个阶段，全面考虑安全因素。工艺开发阶段，需深入分析化学反应特性与潜在风险，为后续设计奠定基础。工程设计阶段，依据工艺要求，通过合理布局、选用安全设备等手段，降低风险发生可能性。生产运营阶段，制定严格操作规程与应急预案，确保安全生产。该理论框架强调各阶段紧密衔接，前一阶段为后一阶段提供支持与指导，后一阶段反馈优化前一阶段。通过全流程、全生命周期的安全管理，实现化工过程本质安全，有效降低事故发生概率，减少人员伤亡与财产损失^[2]。

二、工艺设计与优化策略

(一) 设备完整性设计方法

在化工过程本质安全化设计中，设备完整性设计方法至关重要。对于压力容器与管道系统，冗余设计可有效提升设备运行可

靠性。通过设置备用组件或多重保护机制，能在部分部件出现故障时，保证系统仍可正常运行，降低事故风险。材料选型需综合考虑介质特性、工作环境等因素，选用耐腐蚀性强、强度高的材料，防止因材料问题引发泄漏、破裂等事故。HAZOP分析技术作为一种系统的安全分析方法，对压力容器与管道系统进行全面的危险与可操作性研究，识别潜在危险，分析原因和后果，从而提出针对性的改进措施，优化设计，确保设备完整性，为化工过程本质安全提供保障^[3]。

（二）工艺参数安全边际优化

在化工过程中，工艺参数安全边际优化对于本质安全化设计至关重要。通过精确的热力学模拟与流体力学分析，能够深入了解各参数间的相互作用关系^[4]。一方面，依据模拟分析结果，可对温度、压力、流量等关键工艺参数的安全范围进行精准界定，明确参数波动的极限值，以确保即使在异常工况下，系统仍能维持安全状态。另一方面，针对可能出现的参数偏离情况，构建动态预警机制，设定不同级别的安全阈值，一旦参数接近安全边际，及时发出警报，为操作人员争取处理时间，避免事故的发生。同时，持续优化工艺参数的安全边际，不仅要考虑单一参数的变化，更要兼顾多参数耦合效应，从整体上提升化工过程的安全性与稳定性。

三、过程控制中的监测与管理技术

（一）智能化监测体系构建

1. 关键参数在线检测技术

为实现化工过程本质安全化，构建智能化监测体系的关键参数在线检测技术至关重要。研发集成温度、压力、振动等多参数融合的智能传感器网络，可对化工过程进行全面实时监测。温度参数能反映反应进程与热稳定性，压力参数关乎系统密封性与安全性，振动参数可洞察设备运行状态^[5]。多参数融合的智能传感器网络，通过先进的传感器技术和数据处理算法，将不同类型传感器采集的数据进行整合分析。这不仅提升检测精度与可靠性，还能及时发现潜在安全隐患，为化工过程安全稳定运行提供有力支持，从本质上降低事故发生风险，确保化工生产的安全性与高效性。

2. 设备健康状态评估模型

设备健康状态评估模型对于化工过程的安全稳定运行至关重要。在构建该模型时，可借助机器学习强大的数据处理与分析能力。收集设备运行过程中的各类参数数据，如温度、压力、振动频率等，这些数据反映着设备的运行状况^[6]。将这些数据作为模型输入，利用机器学习算法对数据进行深度挖掘与特征提取，寻找数据间的潜在关系和规律。通过训练与优化模型，使其能够精准识别设备在不同运行状态下的特征模式，进而对设备健康状态进行量化评估。例如，判断设备是否处于正常运行状态、是否存在潜在故障风险等。此模型为化工过程设备健康管理提供科学依据，助力提前发现并解决设备问题，保障化工过程的本质安全。

（二）控制联锁系统优化

1. SIS系统功能安全设计

在化工过程中，SIS系统功能安全设计至关重要。其需充分考虑系统的可靠性与安全性，通过严谨的方法确定安全完整性等级（SIL）。SIL验证是确保SIS系统达到预定功能安全要求的关键环节^[7]。这要求运用科学的评估手段，对系统硬件故障裕度、共因失效等方面进行分析，以准确验证SIL等级是否符合实际需求。在设计过程中，还需注重冗余与多样性配置，提升系统的容错能力，降低因单一故障导致安全事故的风险。同时，要结合化工工艺特点，对SIS系统的逻辑运算、信号处理等功能进行优化，确保系统能快速、准确地响应异常情况，实现对化工过程的有效安全控制，为化工生产构筑坚实的安全防线。

2. 多系统协同联锁策略

在化工过程中，DCS（分散控制系统）与SIS（安全仪表系统）是保障生产安全与稳定运行的关键控制层。两者虽具备数据交互接口，但在设计上应保持功能与硬件独立。DCS主要负责生产过程的工艺控制，依据设定的工艺条件进行常规调节与联锁控制；SIS则专司安全防护，当监测到异常状态时执行紧急切断或停车等保护动作。在多系统协同联锁策略中，DCS可将实时采集的关键过程参数以只读方式传输至SIS，用于辅助判断和状态监控，而SIS的核心判断逻辑基于其独立采集的传感器数据。当传感器采集的参数值超出设定安全范围时，SIS立即触发联锁输出，通过DO信号驱动相应的紧急切断阀或停车机构，实现快速响应，防止事故扩大^[8]。这种“功能独立、信息交互”的系统架构不仅避免共因失效风险，也显著提升化工过程的安全性与可靠性，确保生产过程处于本质安全状态。通过这种紧密的数据交互与联动控制，提高化工过程的安全性与可靠性，确保生产处于本质安全状态。

四、新技术应用与系统集成

（一）数字孪生技术应用

1. 三维可视化监控平台

在化工过程本质安全化设计与控制策略研究中，三维可视化监控平台基于数字孪生技术发挥关键作用。此平台借助物联网采集的数据，构建出化工过程的高精度三维虚拟模型，实现对化工设备、管道等设施的精准映射。平台可实时呈现设备运行状态、工艺参数变化等信息，让操作人员仿佛置身真实场景进行监控^[9]。通过数字孪生技术的应用，它能对潜在安全隐患进行可视化预警，例如设备温度异常升高、压力超出阈值等，以直观图形方式及时提醒相关人员。同时，利用虚拟模型模拟故障场景，辅助制定科学有效的应急处理方案，帮助操作人员在实际事故发生前熟悉应对流程，大幅提升化工过程的安全性与可控性，为化工过程本质安全化设计与控制提供有力支持。

2. 异常工况仿真预警

在化工过程中，借助数字孪生技术进行异常工况仿真预警对实现本质安全化设计与控制至关重要。数字孪生技术通过构建与实际化工过程高度匹配的虚拟模型，能实时反映真实系统的运行状态。对于异常工况，该虚拟模型可基于历史数据、实时监测数

据以及化工过程机理，模拟不同异常状况下系统参数的变化趋势。例如，模拟管道堵塞、温度骤升等异常工况时，模型精准呈现压力、流量等参数变化。依据这些模拟结果，提前设定合理的预警阈值，当实际监测参数接近或超出阈值，立即发出预警信号，提醒操作人员及时采取措施，避免事故发生，为化工过程安全稳定运行提供有力保障^[10]。

（二）预测性维护系统开发

1. 大数据分析平台架构

大数据分析平台架构在化工过程本质安全化设计与控制策略研究中起着关键作用。以 Hadoop 为基础搭建工艺数据处理框架，其分布式文件系统（HDFS）能高效存储海量工艺数据，为后续分析提供数据支撑。MapReduce 编程模型可实现对数据的并行处理，提升处理效率。结合 Hive 数据仓库工具，能对数据进行结构化管理，便于查询和分析。同时，引入 Spark 计算框架，利用其内存计算优势，快速处理实时工艺数据，实现对化工过程关键参数的实时分析。此外，通过搭建数据可视化模块，将分析结果以直观图表形式呈现，辅助管理人员及时掌握化工过程状态，为本质安全化设计与控制策略的制定提供有力的数据支持，保障化工过程安全、稳定运行。

2. 维护决策支持算法

在化工过程预测性维护系统开发的维护决策支持算法中，深度强化学习发挥着关键作用。深度强化学习能够处理复杂且动态的化工过程数据，通过智能体与环境的不断交互学习，优化维修计划。算法会考虑设备运行状态、历史故障数据、维护成本等多方面因素，构建状态空间与动作空间。智能体依据当前状态选择维护动作，通过奖励机制反馈动作优劣，持续调整策略。例如，当设备某项参数接近异常阈值，智能体可选择提前维护动作，若维护后设备稳定运行且成本合理，会得到正向奖励，反之则负向奖励。以此反复学习，智能体可形成最优维护决策策略，在保障化工设备安全稳定运行的同时，降低维护成本，实现本质安全化设计与控制策略的目标。

（三）安全控制体系集成

1. 多系统数据融合技术

在化工过程本质安全化设计与控制策略研究中，多系统数据融合技术是关键环节。化工生产常涉及多个复杂系统，各系统数

据格式、通信协议差异大。OPC UA 协议应用于异构系统集成，为多系统数据融合奠定基础。它能打破不同系统间数据交互壁垒，使设备层、控制层与管理层数据实现无缝传输。通过该协议，温度、压力、流量等各类实时数据，可被准确采集、整合。在此基础上，利用数据挖掘、机器学习等技术，对融合后的数据深度分析，挖掘潜在安全信息，预测可能出现的安全隐患，提前制定防控措施，保障化工生产过程安全稳定运行，实现本质安全化设计与控制。

2. 安全防护层架构设计

安全防护层架构设计以 IEC 61511 标准为基础，旨在构建一个全面、高效且可靠的多层次防护体系。该架构涵盖多个关键部分，通过不同层级的功能协同来保障化工过程本质安全。从底层的基本过程控制系统，对化工生产的常规参数进行实时监测与精准调节，确保生产过程的稳定运行。到中间的安全仪表系统，当出现异常情况，可能威胁到安全时，迅速做出响应，执行紧急停车等操作，防止事故扩大。再到上层的应急响应系统，针对更为严重的事故场景，制定科学的应急预案，组织有效的救援行动。各层级之间信息交互顺畅，共同组成一个有机整体，以实现化工过程在各种复杂情况下的本质安全，最大程度降低事故发生概率及危害程度。

五、总结

化工过程本质安全化设计与控制策略研究，对于提升化工行业的安全性与可持续发展意义重大。本质安全化设计方法体系通过消除、替代、减弱、简化等原则，从源头上降低危险，为化工过程奠定安全基础。智能化控制策略借助先进技术实现实时监测与精准调控，进一步增强安全保障。未来，数字化、智能化技术将成为化工安全领域的关键驱动力。通过建立数字化模型、应用大数据分析和人工智能，实现对化工过程更高效的风险评估与预警。同时，智能化技术可优化控制策略，提升自动化水平，减少人为失误。这些技术的融合发展，将为化工行业构建更可靠、更智能的安全防线，推动行业朝着本质安全的方向稳步迈进。

参考文献

- [1] 陈波. 化工过程动态异常侦测与自愈控制 [D]. 中国石油大学(北京), 2022.
- [2] 高佳文. 面向复杂化工过程的在线估计反演控制研究 [D]. 北京化工大学, 2021.
- [3] 段辰明. 基于时空图的化工过程安全预警研究 [D]. 大连理工大学, 2023.
- [4] 刘瀚泽. 基于定目标和系统综合的化工过程安全风险削减方法研究 [D]. 青岛科技大学, 2023.
- [5] 张中秋. 基于多任务学习的化工过程调控策略预测方法及应用 [D]. 北京化工大学, 2023.
- [6] 单俊昊. 化工生产过程本质安全技术的研究 [J]. 华东纸业, 2023, 53(10): 4-6.
- [7] 朱佳兴, 郝琳, 刘国钊, 等. 化工过程本质安全评估方法研究进展与展望 [J]. 化工进展, 2022, 41(08): 4009-4024.
- [8] 黄绪山, 郑天军. 提高炼油与化工过程自动化水平策略 [J]. 石化技术, 2022, 29(05): 254-256.
- [9] 潘智慧, 孙继宝, 孙明辉. 石油化工过程安全技术的研究进展 [J]. 化工管理, 2021, (09): 117-118.
- [10] 杨哲. 创新引领化工过程本质安全化技术变革 [J]. 安全、健康和环境, 2021, 21(01): 3-4.