

Safety integrity level assessment technology for chemical equipment

Qingjun Wang

Yunnan Dacheng Safety Technology Service Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650118, China

Abstract

With the rapid development of the chemical industry, the safety of chemical plants has become a key factor in ensuring production safety. The Safety Integrity Level(SIL) evaluation technology, as a standard for measuring the effectiveness of safety functions in chemical plants, has been widely applied in risk assessment and safety management in the chemical field. This paper systematically introduces the concept and importance of Safety Integrity Level(SIL) in chemical plants, explores the demand for SIL in different risk environments, and analyzes the development history and current status of evaluation technology. It also elaborates on the process of SIL evaluation for chemical plants, including preparation, risk analysis, and data collection, with a focus on the application of key techniques such as hazard analysis, Failure Mode and Effect Analysis(FMEA), and quantitative evaluation methods. Through case studies, the paper discusses the practical application and challenges faced by evaluation technology in different types of chemical plants. The research aims to provide theoretical support and practical guidance for safety management in the chemical industry.

Keywords

Safety Integrity Level; SIL Evaluation; Chemical Plant; Risk Assessment; Hazard Analysis

化工装置安全完整性等级评估技术

王清君

云南大成安全技术服务有限公司，中国·云南昆明 650118

摘要

随着化工行业的快速发展，化工装置的安全性成为保障生产安全的关键。安全完整性等级（SIL）评估技术作为衡量化工装置安全功能有效性的标准，已经广泛应用于化工领域的风险评估与安全管理中。本文系统介绍了化工装置安全完整性等级（SIL）的概念及其重要性，探讨了化工装置在不同风险环境下对安全完整性等级的需求，分析了评估技术的发展历程与现状。本文还详细阐述了化工装置安全完整性等级评估的流程，包括评估前准备、风险分析、数据收集等内容，重点介绍了危险分析、失效模式与效应分析（FMEA）及定量评估技术等关键技术的应用，并通过实例分析，探讨了评估技术在不同类型化工装置中的实际应用与面临的挑战。通过对评估技术的研究，旨在为化工行业的安全管理提供理论依据和实践指导。

关键词

安全完整性等级；SIL评估；化工装置；风险评估；危险分析

1 引言

化工装置的安全性一直是行业内最为关注的问题之一，尤其是在高危化学品的生产和运输过程中，任何微小的失误或疏漏都可能导致严重的后果。安全完整性等级（SIL）评估技术作为一种有效的安全管理工具，能够帮助工程师评估并确保化工装置中安全系统的可靠性和有效性。SIL 的评估不仅涉及到化学反应过程中的安全控制，也包括装置整体的风险评估、故障模式分析以及系统的容错能力。随着安全管理要求的不断提升，SIL 评估在化工装置中的应用越来越广泛，成为保障生产安全的重要手段。本文将从化工装置安全

完整性等级的定义出发，详细探讨其评估技术及应用，通过理论分析与实践案例，深入分析 SIL 评估技术对化工装置安全性的提升作用。

2 化工装置安全完整性等级评估技术概述

2.1 安全完整性等级（SIL）的定义与重要性

安全完整性等级（SIL）是用于衡量化工装置中安全系统功能有效性的指标。SIL 的评定基于装置在发生故障或潜在危险时，安全系统的可靠性和有效性。其主要目标是确保设备能够防止灾难性事故的发生，保障人员安全和环境保护。SIL 等级的设定依据不同危险源对安全控制要求的不同，以确保在设计、运行和维护过程中，装置能够满足相应的安全标准。SIL 越高，表示安全系统的可靠性越强。通过实施 SIL 评估，能够有效识别潜在的安全隐患，并采取相应的技

【作者简介】王清君（1988-），男，中国云南省楚雄人，本科，工程师，从事安全工程、化学工程与工艺研究。

术措施进行整改，从而降低事故发生的概率，确保化工企业的安全生产。SIL 评估已成为国际标准化组织推行的重要工具，广泛应用于化工、石油、天然气等高危行业。

2.2 化工装置中的安全完整性需求

化工装置的安全完整性需求主要体现在对安全控制系统的高可靠性要求。化工生产过程中，操作环境复杂且存在多种潜在风险，如设备故障、操作失误或自然灾害等。为了确保生产安全，必须对装置进行全面的风险分析，并设计相应安全系统来应对这些风险。化工装置需要根据不同的危险源、可能的事故类型以及可能造成的后果来设定安全完整性等级。高危操作如高温、高压反应等，需要更为严格的 SIL 要求，以确保安全系统能够及时响应并有效防止灾难性事件的发生。此外，安全完整性需求还包括对设备寿命周期的管理，确保设备在整个使用过程中持续保持高效的安全性。科学的 SIL 评估能够在风险控制上提供指导，帮助企业设计、优化安全防护措施，降低事故发生概率。

2.3 评估技术的发展历程与现状

SIL 评估技术的应用始于 20 世纪 80 年代，随着化工装置安全管理的需求不断增加，评估方法不断发展与完善。最初，SIL 评估技术依赖于基于经验的判断和定性分析，随着计算机技术的发展，定量分析方法逐渐应用于安全评估中。90 年代，SIL 评估技术在国际标准化进程中取得了显著进展，尤其是国际电工委员会（IEC）发布了 IEC 61508 与 IEC 61511 标准，明确了 SIL 的评估方法和要求。这些标准的出台为化工行业的安全评估提供了统一的技术框架。如今，SIL 评估技术已广泛应用于化工、石油、天然气等高危行业，并且与其他安全管理体系如风险管理、事故预防等紧密结合。现阶段，SIL 评估方法不仅局限于传统的故障树分析和失效模式分析，还引入了更多先进的定量评估工具，推动了评估技术的精细化和智能化发展。

3 化工装置安全完整性等级评估流程

3.1 评估前准备与数据收集

化工装置安全完整性等级（SIL）评估的第一步是准备工作和数据收集。首先，需要对化工装置进行全面的风险识别，识别过程中应包括所有可能的危险源，如设备故障、操作失误、环境因素等。其次，收集与安全相关的基础数据，如设备的历史故障记录、操作条件、事故案例以及设备的设计标准等。这些数据的准确性和全面性是 SIL 评估的基础。除了基础数据，还需要获取装置的工艺流程图、控制系统结构图、设备性能指标等技术资料，这些信息将帮助评估人员深入了解装置的安全性能。数据收集的过程中应充分考虑装置的运行环境、使用条件以及可能面临的极端情况，从而为后续的安全功能分析和风险评估奠定坚实基础。

3.2 安全功能分析与风险评估

安全功能分析是 SIL 评估过程中的核心环节，主要目

的是明确化工装置中每个安全系统的功能要求及其对整体安全性的贡献。在分析过程中，评估人员需要对每个安全功能进行详细的描述，并确定其对防止事故发生、减轻事故后果的作用。安全功能分析通常采用失效模式与效应分析（FMEA）或故障树分析（FTA）等方法进行。通过这些方法，能够识别出潜在的安全风险，并评估不同风险因素的发生概率及其对安全系统的影响。同时，风险评估也会结合装置的具体工艺和操作环境，确定风险控制措施的优先级，提出优化安全系统的建议。风险评估过程中应考虑到事故发生的概率、后果的严重性以及控制措施的有效性，以确保评估结果的科学性和准确性。

3.3 评估结果的分析与等级确认

在完成安全功能分析和风险评估后，评估人员将根据数据和分析结果确定安全系统的 SIL 等级。SIL 等级的确认是基于预定的安全功能要求与系统的实际表现之间的比较。评估人员需要将系统的可靠性、响应时间、故障率等指标与标准要求进行对照，确认系统是否符合安全完整性等级的要求。如果评估结果表明某些安全功能未达到要求，则需要对系统进行改进或优化，以提升其安全性。在确认 SIL 等级的过程中，还需要考虑设备的维护情况和长期运行的稳定性，确保评估结果的持续有效性。最终，通过等级确认，可以为化工装置的安全管理提供明确的指导，帮助企业在生产过程中不断提升安全管理水

4 化工装置安全完整性评估的关键技术

4.1 危险分析与故障树分析

危险分析与故障树分析是化工装置安全完整性评估中的核心技术之一。危险分析通过识别和评估潜在的危险源，明确装置运行过程中可能的风险，进而为安全防护措施提供依据。故障树分析（FTA）则是一种通过树状图形分析系统故障及其原因的技术，它能够系统化地展示出从初始故障到最终事故发生的因果关系。通过这种方式，可以识别出系统中最薄弱的环节，并制定相应的风险控制策略。故障树分析不仅有助于揭示故障链的脆弱点，还能够量化风险事件的发生概率，为后续的安全防护措施设计提供理论依据。这些分析方法能够全面评估化工装置中的潜在危害，提高安全管理水，确保生产过程中人员、设备和环境的安全。

4.2 失效模式与效应分析（FMEA）

失效模式与效应分析（FMEA）是另一种广泛应用于化工装置安全评估的技术。FMEA 通过识别每个组件或系统的失效模式，分析这些失效对装置安全运行的影响及其后果。每一种潜在的失效模式都会被详细记录，并根据其可能导致的后果进行优先级排序，从而确定最关键的安全隐患。FMEA 的核心在于通过评估不同失效模式的发生频率、严重程度和可检测性，计算出每个失效模式的风险优先级数（RPN），从而为制定合理的安全措施提供依据。该技术能

够帮助工程师在设计和维护阶段预见并消除潜在风险，提前采取行动进行改进，大幅度降低化工装置在运行过程中发生重大事故的风险。

4.3 定量评估技术与工具的应用

定量评估技术是化工装置安全完整性等级评估中的关键环节之一，旨在通过数值化的方式对系统的安全性进行量化分析。这些技术通常基于概率论、统计学以及可靠性工程等理论，对安全系统的各个组件进行精确的风险评估和可靠性分析。常见的定量评估方法包括故障树分析（FTA）、事件树分析（ETA）等。这些方法能够通过计算组件故障的概率、系统故障的连锁反应以及整个安全系统的可靠性，得出系统的整体安全完整性指标。为了提高评估的准确性，定量评估工具通常会结合现代计算机技术进行仿真分析，以应对复杂系统中多重变量和动态变化的挑战。通过应用定量评估工具，化工装置的安全性得到了全面的量化分析，为安全系统的设计、运行与维护提供了科学依据。

5 化工装置安全完整性评估的实际应用

5.1 某化工装置 SIL 评估分析

某化工装置的 SIL 评估分析通过全面的危险分析和安全功能评估，确定了装置在不同运行状态下的安全完整性要求。评估过程中，首先对装置的各个关键安全功能进行了详细分析，识别出可能引发重大事故的危险源。然后，通过故障树分析（FTA）和失效模式与效应分析（FMEA），评估了各安全子系统的可靠性和潜在故障风险，最终得出了装置应达到的安全完整性等级（SIL）。评估结果显示，部分关键控制系统未能满足所要求的 SIL 等级，针对这一问题，提出了改进建议，包括增加冗余设计和提升故障检测能力。通过该评估，装置的安全性得到了有效提升，为后续的操作和维护提供了明确的指导。

5.2 评估技术在不同类型化工装置中的应用

评估技术在不同类型化工装置中的应用表现出明显的差异性。在石油化工领域，由于其生产过程中涉及的高温、高压以及有毒化学品等特殊因素，对安全系统的要求极高，因此需要采用更为严格的 SIL 评估标准和技术。而在其他如制药、食品加工等行业，虽然同样需要保障安全，但由于生产环境相对较为温和，其评估技术可以相对简化。不同装置的 SIL 评估标准和技术应用，需结合其工艺特点、风险源特

性以及安全需求进行量体裁衣。无论是传统的化工装置还是现代化的自动化装置，评估技术都能够为各类装置提供针对性的安全评估方案，确保设备和人员的安全。

5.3 评估技术应用中的问题与解决方案

尽管化工装置安全完整性等级评估技术得到了广泛应用，但在实际应用中仍然存在一些问题。首先，部分装置的数据采集不完整，导致评估结果的准确性受到影响。其次，评估方法和工具的选择有时未能完全考虑装置的复杂性和运行环境，致使评估结果无法充分反映实际风险。为了解决这些问题，可以通过完善数据采集体系，确保数据的全面性和准确性，进一步提高评估模型的可信度。此外，评估人员还应根据装置的特殊性和发展趋势，不断更新评估方法与工具，增强评估技术的适应性和前瞻性。通过这些改进措施，可以有效提升 SIL 评估技术的应用效果，为化工装置的安全运行提供更为坚实的保障。

6 结语

化工装置安全完整性等级（SIL）评估技术在确保化工生产安全中发挥着至关重要的作用。通过全面的风险识别、系统的功能分析和严格的评估流程，SIL 技术能够有效地识别潜在的安全隐患，帮助企业在设计、运行和维护过程中优化安全防护措施。随着化工装置技术的不断发展和安全管理要求的提升，SIL 评估技术也在不断进化，越来越多的定量分析工具和智能化方法被引入评估体系中，提升了评估的准确性和可靠性。然而，在实际应用过程中，仍然存在数据不足、方法适用性不足等问题，需要进一步完善和优化。未来，随着技术的进步和行业标准的更新，SIL 评估技术将在化工行业中得到更加广泛和深入的应用，为保障生产安全、保护员工生命安全和环境安全提供坚实保障。

参考文献

- [1] 马龙,杜亚君.化工储罐区氮封装置失效模式识别及安全联锁控制参数优化[J].流程工业,2025,(09):16-19.
- [2] 杨培瑞,王青峰,郭遵广,李磊,孙彦平.化工装置大型高塔设备模块化安装的研究[J].化工管理,2025,(26):153-158.
- [3] 范华兵.化工生产装置控制系统整合改造研究[J].现代工程科技,2025,4(15):137-140.
- [4] 田佳.化工工艺设计与安全评价对化工安全生产的影响分析[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(14):25-27.