

化工管道系统安全评价方法及改进建议

邱伟斌¹ 陈雪丹² 赵玖超² 林杰²

1.浙江润和安全技术有限公司；2.浙江泰鸽安全科技有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i8.8341

[摘要] 本论文深入探讨化工管道系统安全评价方法，系统阐述目前常用的安全检查表法、故障树分析法、危险与可操作性研究法等评价方法的原理、应用场景及优缺点。通过分析发现现有方法存在评价指标不够全面、动态适应性不足、数据利用不充分等问题。针对这些问题，从完善评价指标体系、引入智能化技术、加强数据管理与共享等方面提出改进建议，旨在提高化工管道系统安全评价的科学性与准确性，为化工行业安全生产提供理论与实践参考。

[关键词] 化工管道系统；安全评价方法；改进建议

Safety evaluation methods and improvement suggestions for chemical pipeline systems

Qiu Weibin¹ Chen Xuedan² Zhao Jiuchao² Lin Jie²

1. Zhejiang Run'an & Safety Technology Co., Ltd.; 2. Zhejiang Taige Safety Technology Co., Ltd.

[Abstract] This paper discusses the safety evaluation methods of chemical pipeline system in depth, and systematically expounds the principles, application scenarios, advantages and disadvantages of the commonly used evaluation methods such as safety checklist method, fault tree analysis method, and hazard and operability research method. Through the analysis, it is found that the existing methods have some problems, such as insufficient evaluation indicators, insufficient dynamic adaptability, and insufficient data utilization. In view of these problems, some suggestions are put forward from the aspects of improving the evaluation index system, introducing intelligent technology, and strengthening data management and sharing, aiming to improve the scientificity and accuracy of the safety evaluation of the chemical pipeline system, and provide theoretical and practical reference for the safety production of the chemical industry.

[Key words] chemical piping system; safety evaluation methods; Suggestions for improvement

一、引言

化工管道系统承担着化工生产过程中物料输送、能量传递的重要功能，贯穿于化工生产的各个环节。其运行状况直接关系到化工企业的生产效率、经济效益以及人员生命财产安全。化工生产中涉及的物料多具有易燃、易爆、有毒、有害等特性，一旦管道系统出现泄漏、破裂等安全事故，极易引发火灾、爆炸、中毒等严重后果，造成巨大的经济损失和环境污染，甚至威胁周边居民的生命安全。因此，对化工管道系统进行科学、准确的安全评价，及时发现潜在的安全隐患，采取有效的防范措施，是保障化工行业安全生产的关键环节。

随着化工行业的快速发展，管道系统日益复杂，传统的安全评价方法已难以满足实际需求。如何改进和创新安全评价方法，提高安全评价的科学性、准确性和时效性，成为化工领域亟待解决的重要课题。本文通过对现有化工管道系统安全评价方法的梳理与分析，探讨其存在的问题，并提出针对性的改进建议，以期对化工管道系统的安全管理提供有益参考。

二、化工管道系统安全评价常用方法

（一）安全检查表法

安全检查表法（Safety Checklist Analysis, SCA）是一种基于经验的定性安全评价方法。它通过对化工管道系统的各个组成部分、运行环节进行系统分析，结合相关的法规标准、操作规程以及以往的事故案例，制定出详细的安全检查表。检查表中的项目涵盖管道的设计、选材、安装、运行维护、检测检验等方面，每个项目对应明确的检查标准和要求。在实际评价过程中，评价人员依据检查表，对管道系统进行逐项检查，判断是否符合安全要求，并记录存在的问题。

该方法具有简单易懂、操作方便、实用性强等优点，适用于化工管道系统的初步安全评价和日常安全检查。它能够帮助企业快速发现一些显而易见的安全隐患，如管道防腐层破损、支吊架松动、安全附件缺失等。然而，安全检查表法也存在明显的局限性。由于其主要依赖评价人员的经验和专业知识，主观性较强，可能会遗漏一些潜在的、深层次的安全隐患。

此外，检查表的内容一旦确定，难以根据实际情况及时更新，缺乏对新出现的安全问题的适应性。

(二) 故障树分析法

故障树分析法 (Fault Tree Analysis, FTA) 是一种从结果到原因的演绎推理式安全评价方法。它以化工管道系统可能发生的重大事故 (如爆炸、泄漏) 作为顶事件，通过分析导致顶事件发生的各种直接和间接原因，逐步向下推导出中间事件和基本事件，构建出一个类似于倒置树形的逻辑因果关系图。在故障树构建完成后，利用布尔代数等数学方法对故障树进行定性和定量分析。定性分析主要是找出导致顶事件发生的所有最小割集，最小割集代表了系统的潜在故障模式；定量分析则是计算顶事件发生的概率以及各基本事件的重要度，从而确定各因素对事故发生的影响程度。

故障树分析法能够清晰地展示事故发生的因果关系，有助于评价人员深入理解化工管道系统的安全风险，找出关键的风险因素。它不仅可以进行定性分析，还能实现定量评价，为风险评估提供较为准确的数据支持。但该方法也存在一定的缺陷，故障树的构建过程复杂，需要评价人员具备较高的专业知识和丰富的实践经验，且对基础数据的要求较高。如果基础数据不准确或不完整，会导致分析结果出现偏差。此外，故障树分析法侧重于分析已发生或可能发生的事故，对于新出现的风险因素和复杂的系统交互作用考虑不足。

(三) 危险与可操作性研究法

危险与可操作性研究法 (Hazard and Operability Study, HAZOP) 是一种基于引导词的系统性安全评价方法。它以化工管道系统的工艺参数 (如温度、压力、流量、液位等) 为研究对象，通过选择合适的引导词 (如“无”“过量”“反向”等)，对工艺参数的偏离情况进行分析，探讨可能导致的危险和可操作性问题。在实施过程中，通常由多专业人员组成评价小组，包括工艺、设备、仪表、安全等方面的专家。评价小组根据管道系统的工艺流程，划分若干个分析节点，针对每个节点的工艺参数，运用引导词进行系统分析，识别出潜在的有害因素，并提出相应的改进措施和建议。

HAZOP 方法能够全面、细致地识别化工管道系统中潜在的危险和操作问题，尤其适用于对新工艺、新装置以及复杂系统的安全评价。它强调多专业人员的协作，从不同角度对系统进行分析，提高了评价结果的准确性和可靠性。然而，该方法也存在一些不足之处。HAZOP 分析过程耗时较长，需要投入大量的人力和时间成本。此外，其分析结果在很大程度上依赖于评价小组的专业水平和经验，不同的评价小组可能会得出不同的评价结论。

(四) 层次分析法

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是一种将定性分析与定量分析相结合的安全评价方法。它首先将化工管道系统安全评价问题分解为目标层、准则层和指标层等多个层次。目标层为化工管道系统的安全评价目标；准则层

包括影响管道安全的各个方面，如设计因素、设备因素、操作因素、管理因素等；指标层则是准则层下具体的评价指标，如管道材质、焊接质量、操作人员资质、安全管理制度等。然后，通过建立判断矩阵，对各层次元素之间的相对重要性进行定量分析，计算出各指标的权重。最后，根据各指标的评分和权重，计算出化工管道系统的综合安全评价结果。

层次分析法能够将复杂的安全评价问题层次化、条理化，使评价过程更加清晰、直观。它通过定量计算各指标的权重，避免了主观随意性，提高了评价结果的科学性和客观性。但该方法在构建判断矩阵时，仍然需要评价人员根据经验进行主观判断，存在一定的主观性。此外，如果指标体系设置不合理或判断矩阵不一致性检验不通过，会影响评价结果的准确性。

三、现有安全评价方法存在的问题

(一) 评价指标不够全面

现有安全评价方法的评价指标多侧重于化工管道系统的硬件设施和运行参数，如管道材质、压力等级、泄漏检测等，而对一些软件因素，如企业安全文化、员工安全意识、安全管理执行力等关注不足。实际上，这些软件因素对化工管道系统的安全运行起着至关重要的作用。良好的企业安全文化能够营造全员参与安全管理的氛围，提高员工的安全意识和责任感；有效的安全管理执行力能够确保各项安全规章制度得到严格落实。此外，随着化工行业的发展，一些新的风险因素，如网络安全威胁 (针对智能管道系统)、气候变化对管道运行的影响等，尚未被充分纳入评价指标体系。

(二) 动态适应性不足

化工管道系统的运行工况复杂多变，受到物料性质、操作条件、环境因素等多种因素的影响。而目前的安全评价方法大多基于静态的评价模型，难以实时跟踪和反映管道系统的动态变化。例如，故障树分析法和层次分析法在建立模型时，通常假设系统的参数和条件是固定不变的，无法及时对管道系统运行过程中出现的新情况、新问题进行评估。安全检查表法和危险与可操作性研究法虽然能够在一定程度上发现问题，但也缺乏对系统动态变化的持续监测和自动预警能力。这种动态适应性不足的问题，使得安全评价结果的时效性和准确性受到影响，无法为管道系统的实时安全管理提供有效的支持。

(三) 数据利用不充分

在化工管道系统安全评价过程中，积累了大量的数据，包括管道的设计数据、运行监测数据、维护检修数据、事故统计数据等。然而，现有安全评价方法对这些数据的利用不够充分，未能充分挖掘数据背后隐藏的信息和规律。多数情况下，数据只是被简单地用于判断是否符合标准要求，而没有通过数据分析技术，如数据挖掘、机器学习等，对数据进行深度分析和处理。例如，通过对管道运行监测数据的长期分析，可以预测管道的剩余寿命、提前发现潜在的故障隐患；对事故统计数据进行分析，可以总结事故发生的规律和原因，为制定针对

性的防范措施提供依据。但目前这些数据的潜在价值尚未得到充分发挥，导致安全评价的科学性和准确性受到限制。

（四）评价方法之间缺乏协同

目前，化工管道系统安全评价中常用的各种方法都有其自身的优点和局限性，单独使用某一种方法往往难以全面、准确地评价管道系统的安全状况。然而，在实际应用中，不同评价方法之间缺乏有效的协同和整合。企业在进行安全评价时，通常只是选择一种或几种方法分别进行评价，没有考虑到各方法之间的互补性。例如，安全检查表法可以快速发现一些表面的安全隐患，故障树分析法能够深入分析事故的因果关系，危险与可操作性研究法擅长识别工艺参数偏离导致的问题。如果能够将这些方法有机结合起来，相互补充、相互验证，将能够更全面、准确地评价化工管道系统的安全风险。但目前这种协同评价的模式尚未得到广泛应用。

四、化工管道系统安全评价方法的改进建议

（一）完善评价指标体系

构建全面、科学的评价指标体系是提高化工管道系统安全评价准确性的基础。在现有评价指标的基础上，应进一步拓展指标范围，纳入更多的软件因素和新出现的风险因素。具体而言，增加企业安全文化、员工安全培训效果、安全管理执行力等评价指标，以反映企业安全管理的软实力。对于智能管道系统，应增加网络安全防护、数据隐私保护等相关指标，防范网络安全风险。考虑气候变化对管道运行的影响，设置环境适应性指标，如管道抗腐蚀能力、耐极端天气性能等。同时，定期对评价指标体系进行更新和优化，根据化工行业的发展和实际需求，及时调整和补充指标内容，确保评价指标体系的时效性和科学性。

（二）引入智能化技术

利用智能化技术提高安全评价的动态适应性和实时性。在化工管道系统中安装传感器、监测设备等物联网装置，实时采集管道的运行参数（如温度、压力、流量、应力等）、环境数据（如湿度、风速、土壤腐蚀性等）以及设备状态信息（如阀门开关状态、泵的运行参数等）。通过大数据分析、人工智能等技术，对采集到的数据进行实时处理和分析，建立管道系统的动态安全评价模型。例如，利用机器学习算法对管道运行数据进行训练，构建故障预测模型，实现对管道故障的提前预警。引入数字孪生技术，建立与实际管道系统相对应的虚拟模型，通过实时数据驱动虚拟模型，模拟管道系统的运行状态，直观地展示管道系统的安全风险分布，为安全评价和决策提供支持。

（三）加强数据管理与共享

建立完善的化工管道系统安全评价数据库，对管道设计、运行、维护、事故等各类数据进行统一管理和存储。采用标准化的数据采集和处理规范，确保数据的准确性、完整性和一致性。利用数据挖掘、机器学习等技术，对数据库中的数据

进行深度分析，挖掘数据背后的潜在信息和规律，为安全评价提供更科学的依据。例如，通过分析管道腐蚀数据，建立腐蚀预测模型，为管道的防腐维护提供决策支持。同时，加强企业内部各部门之间以及企业与监管部门、科研机构之间的数据共享，打破数据壁垒。通过数据共享，实现信息互通，提高安全评价的效率和准确性。例如，企业将管道运行数据共享给科研机构，科研机构利用这些数据进行安全评价方法的研究和改进，再将研究成果反馈给企业，形成良性循环。

（四）促进评价方法协同应用

鼓励企业在化工管道系统安全评价中采用多种方法协同应用的模式。根据管道系统的特点、评价目的和实际需求，选择合适的评价方法进行组合。在项目前期设计阶段，可以采用安全检查表和危险与可操作性研究法，对管道系统的设计方案进行全面评估，识别潜在的安全隐患和设计缺陷；在运行阶段，结合故障树分析法和层次分析法，对管道系统的安全风险进行定量评估，确定风险等级和关键风险因素。同时，利用智能化技术对管道系统进行实时监测，当监测到异常情况时，及时采用针对性的评价方法进行深入分析。通过多种方法的协同应用，相互补充、相互验证，提高安全评价的全面性和准确性。此外，建立不同评价方法之间的衔接机制和数据转换标准，确保各方法之间的数据能够顺利流通和共享，实现评价过程的无缝衔接。

五、结论

化工管道系统安全评价是保障化工行业安全生产的重要环节。目前，常用的安全检查表法、故障树分析法、危险与可操作性研究法、层次分析法等安全评价方法在化工管道系统安全评价中发挥了重要作用，但也存在评价指标不够全面、动态适应性不足、数据利用不充分、评价方法之间缺乏协同等问题。为了提高化工管道系统安全评价的科学性和准确性，需要从完善评价指标体系、引入智能化技术、加强数据管理与共享、促进评价方法协同应用以及加强专业人才培养等方面进行改进。通过这些改进措施，能够更全面、准确地识别化工管道系统的安全风险，及时采取有效的防范措施，保障化工管道系统的安全运行，促进化工行业的可持续发展。未来，随着化工行业的不断发展和技术的不断进步，化工管道系统安全评价方法也需要持续创新和完善，以适应新的安全需求和挑战。

【参考文献】

- [1]石油化工铬钼钢管道焊接质量控制策略. 周其圣. 化工设计通讯, 2018(05)
- [2]石油化工管道焊接工艺与质量控制对策探究. 谢兰贺. 化工管理, 2016(06)
- [3]石油化工管道焊接工艺与质量控制措施分析. 吴金宝. 居业, 2017(12)
- [4]石油化工管道焊接工艺和焊接质量控制分析. 张杰. 当代化工研究, 2016(04)