

化工设备与管道设计的可靠性分析与风险评估

杨春玲 于 宇 (山东春旭化工设计有限公司, 山东 济南 250014)

摘要: 本文旨在深入探讨化工设备与管道设计的可靠性分析和风险评估, 以提高化工行业的安全性和生产效率。首先介绍了可靠性理论的基础, 包括故障模式与影响分析 (FMEA)、故障树分析 (FTA) 和可靠性预测模型等方法, 并通过具体的化工设备与管道设计案例蒸馏塔, 展示设计中可靠性实际应用效果。对于化工设备整体的风险评估, 介绍了风险评估的常用方法, 常见的风险因素以及风险如何进行量化分析。本文为化工设备与管道的设计和运营提供了重要的参考, 也为企业保持安全稳产、经济效益增长提供了重要保障。

关键词: 化工设备; 管道; 设计; 安全可靠

0 引言

化工行业作为现代工业体系的重要组成部分, 承担着为社会提供基础化学品和特种化学品的重要任务。这一行业的发展直接关联到国民经济的稳定增长和人民生活水平的提升。在这个过程中, 化工设备及其输送管道的作用不可小觑。它们是化工生产的核心, 其设计和运行效率直接影响到整个行业的安全性和经济效益。因此, 深入探讨化工设备的设计, 特别是其可靠性和风险评估, 对于推动行业的可持续发展具有重大意义。本文的主要目的在于深入分析化工设备设计中的可靠性问题和风险因素, 并提出相应的评估方法, 以指导化工设备的设计和改进。

1 化工设备与管道设计的可靠性分析

1.1 可靠性理论基础

可靠性分析是一种评估和保证产品在预定条件下长期稳定运行的方法论。在化工设备设计领域, 这种分析方法尤为重要, 因为它直接关系到生产的连续性和安全性。可靠性分析的基本理论包括故障模式与影响分析 (FMEA)、故障树分析 (FTA) 和可靠性预测等。这些方法通过系统地识别潜在的故障模式, 评估故障发生的概率以及可能导致的后果, 从而为化工设备与管道设计和改进提供科学依据。

1.1.1 故障模式与影响分析

故障模式与影响分析是一种先进的预防性风险评估工具, 广泛应用于化工设备的设计和输送管道运维中。其核心在于系统地识别和评估设备可能出现的故障模式及其对系统性能的潜在影响。FMEA 过程首先涉及对设备与管道各部件的功能进行详细分析, 然后识别可能导致这些功能失效的故障模式。针对每种故障模式, FMEA 进一步评估其严重性、发生概率和检测难度, 从而计算出风险优先数 (RPN)。这一方法

不仅有助于优先处理高风险故障模式, 还能指导设计师对设备整体运行效果进行改进, 提高其整体可靠性。

1.1.2 故障树分析

故障树分析是一种定性及定量相结合的分析方法, 用于评估特定故障事件的发生概率。通过构建故障树, FTA 将复杂的系统故障模式分解为更简单的事件, 使用逻辑门 (如 AND、OR 门) 来表示这些事件之间的关系。图 1 展示了故障树分析的构建过程。这种方法的关键在于能够直观地展示导致关键故障事件的多种路径, 从而帮助工程师识别和量化系统中的薄弱环节。FTA 的应用不仅限于故障预测, 还包括事故后分析, 为化工设备与输送管道的风险管理和决策提供了科学依据。

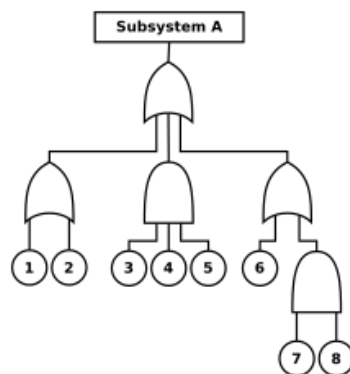


图 1 故障树分析构建过程

1.1.3 可靠性预测模型

可靠性预测模型是基于统计数据和概率理论的分析工具, 用于预测化工设备的可靠性表现。其中, 威布尔分布和指数分布是两种常用的模型。威布尔分布以其灵活性著称, 能够描述多种故障模式, 包括早期故障、随机故障和磨损故障。通过分析设备故障数据, 可以估计威布尔分布的形状参数和尺度参数, 从而预测设备的可靠性。指数分布则适用于描述故障率恒定

的情况，通常用于电子设备的可靠性分析。这些模型的应用使得工程师能够基于历史数据预测设备的未来表现，为维护计划和风险评估提供了重要依据。

1.2 化工设备与管道的可靠性特点

化工设备的可靠性受多种因素影响，其中包括但不限于操作环境、材料特性、设计标准和维护策略。例如，化工设备与管道常常在高温、高压、腐蚀性环境中运行，这些条件对设备与管道材料的耐久性提出了更高的要求。此外，化工反应的复杂性要求设备设计必须精确、可靠，以确保反应过程的控制和产品质量的稳定。因此，可靠性分析不仅需要考虑设备本身的设计参数，还要综合考虑外部环境和操作条件对设备性能的影响。

1.3 精馏塔设备案例分析

精馏塔（蒸馏塔）作为化工过程中关键的分离设备，其性能直接影响到生产效率和产品质量，图2是精馏塔的基本原理设计。因此，确保其设计的可靠性至关重要。

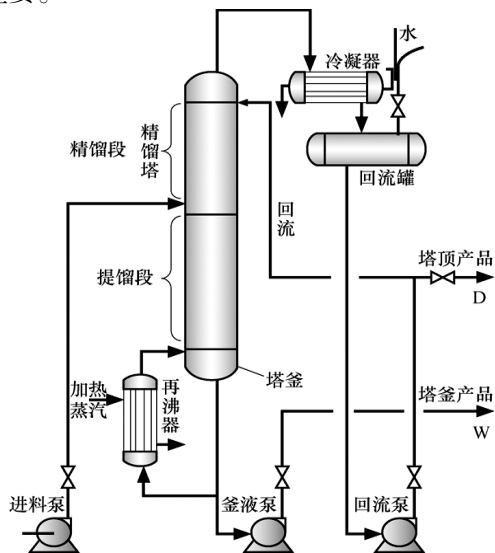


图2 精馏塔整体运行原理效果图

可靠性分析流程：一是故障模式识别。在化工设备的可靠性分析中，故障模式识别是基础且关键的步骤。对于精馏塔这一特定设备，通过综合分析历史运行数据和专家经验，识别了以下主要故障模式：一是塔板损坏：由于化学腐蚀或物理磨损导致塔板性能下降。二是填料堵塞：由于物料沉积或化学反应产物积累引起的填料通道堵塞。三是温度控制失效：控制系统故障或传感器失准导致的温度控制不准确。

在识别了主要故障模式后，采用了故障模式与影响分析方法对每种故障模式进行详细的风险评估，包括严重性评估：考虑故障对生产安全和效率的影响。

例如，塔板损坏可能导致整个蒸馏过程中断，影响极为严重。发生概率评估：基于历史数据和设备运行环境，评估故障发生的可能性。填料堵塞虽然发生概率较低，但一旦发生，对生产的影响极大。检测难度评估：分析故障的可检测性。温度控制失效可能由多种因素引起，检测难度较高。

同时，构建精馏塔的故障树，重点分析了以下几个方面：一是关键故障事件：如塔板损坏导致的整体效率下降。二是故障路径分析：通过逻辑门（如AND、OR门）连接不同的故障模式，分析它们如何共同导致关键故障事件。三是概率计算：基于各故障模式的发生概率，计算整体故障事件的发生概率。

最后，采用威布尔分布模型，结合历史故障数据，对精馏塔设备的可靠性进行预测分析，首先收集精馏塔设备的历史故障数据，包括故障类型、故障发生时间和故障处理情况。基于这些数据，应用威布尔分布模型进行以下分析：一是参数估计：利用最大似然估计法，估计威布尔分布的形状参数和尺度参数，这些参数能够反映设备的故障特性。二是可靠性预测：根据估计的参数，计算设备在未来特定时间内的故障概率和预期寿命。

2 化工设备与管道的风险评估

2.1 风险评估方法

在化工设备与管道输送的风险评估中，采用的方法必须能够全面而准确地识别和分析潜在的风险。这些方法通常结合定性和定量分析，详见表1，以确保评估的全面性和深入性。除了表1里提到的风险评估方法，上文提到的故障模式与影响分析和故障树分析也是常用的化工设备风险评估方法。

表1 风险评估方法

	方法名称	描述
定性分析	专家评审	通过组织有经验的专家团队，对化工设备的设计和操作进行全面审查，识别可能的风险点。这种方法依赖于专家的知识 and 经验，适用于初步风险识别阶段。
	德尔菲法	通过匿名问卷调查的方式收集不同专家对特定风险的看法，然后进行汇总和分析。这种方法有助于达成专家间的共识。
定量分析	事件树分析(ETA)	通过构建事件的逻辑树，分析不同事件发生的概率及其可能导致的后果。这种方法适用于复杂系统的风险评估。
	蒙特卡洛模拟	利用随机抽样技术来模拟和分析风险事件的概率分布。这种方法可以处理大量的不确定性和变量，适用于复杂的风险评估。

在实际应用中，通常需要结合多种方法来进行风险评估。例如，可以先使用FMEA进行初步风险识别，

然后通过 ETA 和 FTA 进行更深入的风险量化分析。这种综合方法能够提供更全面、更精确的风险评估结果。

2.2 风险因素识别

在化工设备风险评估过程中,准确识别风险因素是至关重要的第一步。这一过程涉及对化工设备及其运行环境的深入分析,以确定可能导致故障或事故的各种因素。

2.2.1 设备与管道设计与材料选择

不合理的设计可能导致设备在运行中出现故障。例如,不足的强度设计、错误的尺寸选择不适当的布局规划都可能成为潜在的风险点。化工设备所用材料的耐腐蚀性、耐高温性和机械强度直接影响设备的可靠性。不当的材料选择可能导致设备提前老化、磨损或损坏。

2.2.2 操作与维护

操作人员的非标准操作或误操作是导致设备故障的常见原因。这包括不遵守操作规程、错误的操作顺序或不当的应急响应。定期维护和检修是确保化工设备长期稳定运行的关键。维护不足可能导致设备性能下降,增加故障和事故的风险。

2.2.3 外部环境与安全标准

化工设备与管道的运行环境,如温度、湿度、化学腐蚀性气体等,可能对设备与管道的性能和寿命产生影响。随着安全法规和标准的更新,原有设备可能不再符合最新的安全要求,从而成为潜在的风险源。

2.2.4 技术发展与市场变化

技术的快速发展可能使现有设备迅速过时。滞后于技术发展的设备可能无法满足当前的生产需求,增加故障和事故的风险。市场需求的变化可能导致设备运行在非最佳状态,如过度负荷或长期低负荷运行,这可能影响设备的稳定性和安全性。

2.3 风险量化分析

风险量化分析是将识别出的风险因素转化为可度量的数值,以便更准确地评估其对化工设备与管道安全性和可靠性的影响。这一过程涉及风险概率的计算和潜在后果的评估。

风险概率的计算是风险评估的核心环节,旨在量化风险发生的可能性。这一过程通常基于历史数据和统计模型进行。通过收集和分析历史故障记录,可以估算特定风险发生的频率。这种方法的准确性依赖于数据的质量和数量。利用统计模型,如威布尔分布,

来预测设备故障的概率。这些模型能够考虑设备的使用年限、运行条件等因素。准确的风险概率计算为后续的风险管理提供了科学依据,有助于制定更有效的预防措施和应急计划。

潜在后果的评估关注于风险事件发生后可能产生的影响,包括经济损失和安全环境影响。经济损失评估:计算因设备故障导致的直接和间接经济损失,如维修成本、生产停滞损失等。安全环境影响:评估风险事件对员工安全和环境的潜在影响,包括伤亡事故和环境污染等。这一评估有助于理解风险事件的全面影响,为制定有效的风险缓解策略提供重要信息。

综合风险评分是将风险概率和潜在后果结合起来,为每个风险因素赋予一个量化的评分。通过结合风险发生的概率和后果的严重性,构建风险矩阵,为每种风险分配一个综合评分。同时通过改变风险因素的参数,分析风险评分的变化,识别对总体风险评估最敏感的因素。

3 结语

通过对可靠性理论的基础知识的梳理和具体案例的分析,展示了如何有效地识别和评估化工设备中可能出现的故障模式及其对系统性能的影响。同时,本文还探讨了风险评估的方法和技术,展示了风险评估的应用价值。未来,随着新材料、新技术的发展,化工设备与管道的设计将更加复杂多变,这要求我们不断更新和完善可靠性分析和风险评估的方法。同时,大数据和人工智能技术的应用将为风险评估提供更加精准和高效的工具,使得风险管理更加科学和系统。此外,环境保护和可持续发展的要求也将对化工设备与管道设计提出更高的标准,这需要在风险评估中更多地考虑环境因素和社会影响。从而进一步推动化工行业的安全生产和可持续发展。

参考文献:

- [1] 秦怡晨. 化工设备设计技术现状及发展趋势核心思路 [J]. 山西化工, 2019, 39(04): 129-130+137.
- [2] 朱甜. 化工压力设备设计和使用中的安全可靠性因素 [J]. 化工管理, 2022(36): 132-135.
- [3] 房建明. 化工工艺设计中安全风险分析及控制策略 [J]. 清洗世界, 2022, 38(12): 172-174.
- [4] 谢亚武. 化工设备设计的选材与应用 [J]. 化工管理, 2022(23): 145-148.
- [5] 唐江明. 化工工艺设计中的安全风险及控制 [J]. 化工管理, 2021(13): 173-174.