

# 化工过程本质安全化技术研究进展

李 渊, 闫志国, 赵小红

武汉工程大学化工与制药学院, 湖北 武汉  
Email: 1021101032@qq.com, samanyan@163.com

收稿日期: 2020年12月2日; 录用日期: 2020年12月30日; 发布日期: 2021年1月6日

---

## 摘 要

本文分析了化工过程本质安全化技术的研究背景, 总结了化工过程本质安全的概念和本质安全化技术的主要设计原则, 对五类本质安全指数评价方法和本质安全的换热网络优化设计的研究进展进行详细综述, 指出了各本质安全指数评价方法的优缺点。结合评价方法探讨了本质安全化设计原则在化工生产实践中的应用, 也就是本质安全的换热网络优化设计。同时指出本质安全原则与换热网络集成方式以及建立求解本质安全换热网络同步优化的数学模型是该技术的关键, 可作为未来的研究方向。

## 关键词

化工过程, 本质安全, 指数评价方法, 换热网络优化

---

# Research Progress of Inherent Safety Technology in Chemical Process

Yuan Li, Zhiguo Yan, Xiaohong Zhao

School of Chemical Engineering and Pharmacy, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei  
Email: 1021101032@qq.com, samanyan@163.com

Received: Dec. 2<sup>nd</sup>, 2020; accepted: Dec. 30<sup>th</sup>, 2020; published: Jan. 6<sup>th</sup>, 2021

---

## Abstract

This paper introduces the research background of inherent safety technology in chemical process, introduces the concept of inherent safety of chemical process and the main design principles of inherent safety technology, summarizes the research progress of five types of inherent safety index evaluation methods and the optimization design of heat exchanger network of inherent safety, and points out the advantages and disadvantages of each inherent safety index evaluation method.

**This paper focuses on the application of inherently safe design principle in chemical production practice, that is, the optimization design of inherently safe heat exchanger network. At the same time, it is pointed out that the integration of inherent safety principle and heat exchanger network and the establishment of mathematical model for solving the synchronous optimization of inherently safe heat exchanger network are the key points of this technology, which can be used as the research direction in the future.**

## Keywords

**Chemical Process, Inherent Safety, Index Evaluation Method, Optimization of Heat Exchanger Network**

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

化学工业的日益发展,为我国现代化建设、经济发展做出了巨大贡献。但是,各类事故的频发也为化工行业的发展带来了巨大挑战。化工过程安全(CPS, Chemical Process Safety)作为一门新兴的学科,是预防和控制化工事故的重要手段。为了提高化工过程的安全性,一种有效的方法就是本质安全化设计技术[1]。该技术是化工过程安全的第一道防线,也是预防化工事故发生最有效的策略。依据本质安全化设计的化工过程可以容忍人员的误操作,具有更强的抵御非正常工况的能力。因此研究本质安全化设计技术对我们提高化工过程安全化水平,防止各类安全事故,保障企业安全发展有重要的意义[2]。

化工过程本质安全化设计与传统设计两者的根本区别在于源头消减和末端控制危险。在最后的 design 阶段,传统的 process design 只是通过危险性分析查找危险源,且是被动的,采用无源与有源和程序安全等策略(例如分离和内部的锁定装置)来控制危险;此外还可采用应急响应以及其他安全策略,来减轻事故后果。化工过程本质安全化设计在设计阶段将产生危险的因素和预防事故的措施纳入设计中,将本质安全特性作为 process design 的目标和出发点之一,寻求风险最小化的途径和方案[3]。

## 2. 化工过程本质安全化设计原则

20 世纪中期,随着世界科技的迅猛发展,各种工业灾难不断发生,各国科学家逐渐形成了在源头消灭危险的研究思路,提出了本质安全的理念。英国安全专家 Trevor Kletz 于 1977 年首次提出化工过程的本质安全(Inherent safety)概念[4]。如今,化工过程本质安全化是指采用无毒或低毒原料代替有毒或剧毒原料,采用无危害或危害性比较小的符合安全卫生要求的新工艺、新技术、新设备[5]。通过多年的实践和总结,主要采取以下本质安全化设计原则[5]:

### 1) 最小化

化工生产过程中的危险化学品质量和能量的最小化。危险化学品包括危险的原料、中间产物和产品。这样即使危险化学品泄露,也不会造成重大的人员伤亡、财产损失和环境污染。

### 2) 替代

采用危险性小的化学品或合成路径替代高危化学品或合成路径。在传统的生产过程中,为了达到产物的高效分离等目的,会使用有毒有害的溶剂。

### 3) 缓和

在危险性较低的缓和条件下使用危险化学品。如：使用稀释的化学品，采用滴加的进料方式等降低反应的剧烈程度。

### 4) 简化

化工流程设计时采用简化原则。降低工艺流程的复杂程度，能够在一定程度上避免和减少误操作导致事故的发生。

在实际化工生产过程中，上述原则应当依次按照最小化、替代、缓和及简化的原则选择，然后再综合考虑，同时运用。由此可见，各原则在应用时存在一定的交叉，原则之间可能会相互抵触，如反应精馏满足最小化原则，但是不符合简化原则，只能通过深入理解反应及失效时的特性，综合评价过程的本质安全性[6]。本质安全原则的应用发展较慢，主要归因于应用本质安全的经济效益没有得到广泛认可；传统过程开发模式中引入安全分析较晚，应用本质安全的机会下降；与新过程开发比较，对已有过程应用本质安全更加困难；本质安全的应用有赖于新型过程的开发等诸多因素。

为了更加形象直观地表示各种本质安全设计原则，可以采用本质安全鱼骨图(图1)解释。

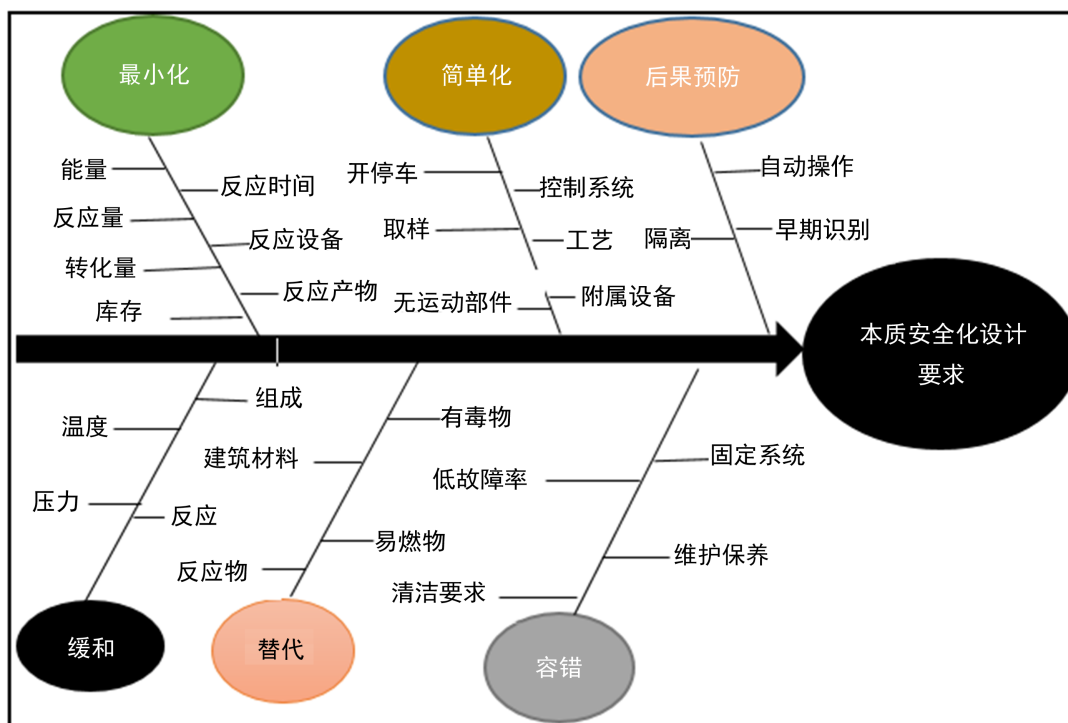


Figure 1. Fish bone diagram of inherent safety principle

图1. 本质安全原则鱼骨图

## 3. 化工过程本质安全指数评价方法分类

对工艺过程的本质安全化的量化表征是研究的重点方向，研究人员提出了多种本质安全化的评价指数设计方法[7]。按照本质安全指数方法的特点，可以将其分为以下五类：

1) 丰富和完善本质安全评价指标的范围，使其能全面的描述实际化工过程的安全化水平。

最早开发的指数型评价方法是 Edwards 和 Lawrence [8]于 1993 年提出的本质安全原型指数法 (Prototype Index for Inherent Safety, PIIS)，该方法主要包括：化学物质指数和工艺过程指标，前者主要包

括存量、易爆和毒性；后者主要包括温度、压力和产率等指标。该方法的优点是：在过程设计早期，不能获得详细的过程信息也可以使用；缺点是：未考虑各个指标的权重因素，评价指标的划分和赋值计算过于简单。本质安全指数法(Inherent Safety Index, ISI)是 Heikkila [9]于 1996 年提出，该方法在本质安全原型指数法(Prototype Index for Inherent Safety, PIIS)的基础上扩大了指标范围，首次将本质安全指标应用于工艺设计中。该方法的优点是：指标覆盖因素多，评价准确性高，必须要求输入的信息少。缺点是：评价结果主观性太强，计算量大，花费时间长，不能说明复杂过程的安全性。2002 年，Palaniappan 等针对以上两种本质安全评价指数区间划分不明显的问题，开发了 i-safe 指数法。该方法增加了 5 个补充指标，分别为危险化学指标(Hazardous Chemical Index, HCI)、危险反应指标(Hazardous Reaction Index, HRI)、总化学指标(Total Chemical Index, TCI)、最坏化学指标(Worst Chemical Index, WCI)、最坏反应指标(Worst Reaction Index, WRI)，当 PIIS 和 ISI 两指标评价分数十分接近时，会选择以上的补充指标对其进行安全评价[10]。

2) 综合考虑化工过程对周围环境和员工健康的影响，拓展本质安全评价指数的适用范围。

着眼整个生命周期的本质安全评价，为了应对化工过程的复杂性和多样性，必须建立综合考虑 HSE 影响的评价方法。Koller 等[11]提出了综合考虑安全、健康、环境的指数评价方法(Environment, Health, Safety Index, EHS)。该方法在医药、农药和精细化学品等间歇生产过程的安全评价有独特的优势。该方法缺点是：没有充分考虑反应釜内各个物质间相互作用和发生事故后可能导致的协同风险。2011 年，英国为了促进本质安全化原则在化工过程全生命周期中的应用，成立 INSIDE 项目，开发了 INSET 工具箱[12]。该工具箱的优点是：一是基于大量专业知识提供的程序和表格，可靠且便于使用。二是工具箱中包含安全、健康、环境三者集成评价模块，考虑的更加全面。所以，应用其他学科知识开发更加符合实际情形的评价方式和流程也是重要的研究方向。

3) 为了能将本质安全指数评价方法从理论研究运用到化工生产中，将该方法集成到过程模拟软件中。

本质安全指数评价的另一个重要应用为本质安全评价模块开发及嵌入过程模拟工具的研究。Leong 和 Shariff 等[13]提出本质安全指数模型(Inherent Safety Index Module, ISIM)。该模型是在化工流程模拟软件 HYSYS 中集成本质安全指数模型 ISIM、IRET 评价模块。通过从 HYSYS 中提取相关过程信息，并从中分析本质安全水平、事故发生的可能性和事故的严重性。该模型具有方便、高效、经济的优点。Leong 等[14]提出过程路径指数法(Process stream index, PSI)将爆炸上限与爆炸下限作差，两者的差值来评价易燃易爆物的爆炸水平，该方法的优点是综合考虑了过程温度和压力对爆炸上下限的影响。此外，把该方法集成到化工流程模拟软件 HYSYS 中，在化工过程模拟时选择出本质安全的过程路径。Shariff 等[15]提出过程流股指数法(Process Stream Index, PSI)，从发生爆炸的潜力角度，评价化工流程模拟软件 HYSYS 过程中所有流股的本质安全水平，从而避免甚至减少爆炸危险性水平。

以上所提出的本质安全指数评价方法，根据模拟得到的工艺条件对化工过程的本质安全、事故结果、风险概率进行评价，为过程设计提供分析工具。类似于经济、环境等评价模块，本质安全指数评价的模块化、工具化有利于提高从业者的积极性和工作效率，内嵌于过程模拟优化软件也是重要的推广方式，因此，提高本质安全化技术的智能化程度也是一个重要的研究方向。

4) 为了克服本质安全指数方法区间划分和权重分配的不合理性，提出了改进的本质安全指数方法。

Gentile 等[16]运用模糊逻辑理论，弥补了本质安全指数法(ISI)指标主观性强的缺点，提出模糊逻辑本质安全指数法(Fuzzy Based Inherent Safety Index, Fuzzy Based ISI)。模糊逻辑系统基于 if-then 规则，将本质安全指标以“高中低”的语言变量输入，通过隶属变度函数之后输出，从而确定其对应的本质安全指数值。此外，2008 年，Srinivasan 等[17]提出了本质优良性指数法(Inherent Benign-ness Indicator, IBI)，就是将统计学的方法运用到安全评价的过程中，运用主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)

分析各影响因素,找到过程中的最佳路径,该方法的优点是:能够避免指数评价法中权重和范围划分主观性强的缺点。以上改进的本质安全指数方法,通常所用的数学方法本身具有局限性。这些指数评价方法一般将评价范围分成若干小区间并进行赋值的做法,会产生低敏感性的问题。

5) 考虑化工过程全生命周期的本质安全管理,提出了通用性本质安全指数评价方法。

作为决定过程特征的重要阶段,通过本质安全技术与成熟过程综合方法的有效集成,建立指导化工过程本质安全的决策系统性方法。Khan [18]提出集成的本质安全指数法(Integrated Inherent Safety Index, I2SI)。该方法包含两个子指标:危害指标和应用本质安全原则指标,二者通过集成获得总体安全性评价指标。该方法的优点是:将本质安全的原则独立运用。2003年, Gupta and Edwards [19]提出了图示法,用一个总的本质安全设计指标(Inherent Safety Design Index, ISDI)表示不同反应过程的安全评价,对不同化学反应路径中易燃性、易爆性、毒性等指标单独计算,并对单个指标进行评价。该方法的优点是:能够直观地看出不同合成路径中各个本质安全指标大小。

以上定量的本质安全指数评价方法仅用于指导如何选择反应路径,降低事故发生时可能带来的损失,但不能确保事故发生的概率。因为化工过程具有强非线性,对于选定的反应路径,系统存在多个稳态,这些稳态操作点的稳定性不完全相同,对于稳定的稳态操作点,他们的稳定性也不尽相同[20]。因此,在化工设计阶段就需要考虑选择具有更好稳定性的稳态操作点,进而从理论上降低化工过程中可能发生事故的的概率,提高化工过程的本质安全化水平。

对于现有的这些本质安全指数评价方法中还存在着较多的不足之处,还需要加强对这些本质安全指数评价方法的分析,然后对其加以改进和完善,才能够提升该方法的科学性[21]。首先,现有的本质安全指数评价方法存在较大的局限性,由于本质安全指数评价工作开展是在化工过程设计的早期阶段,在此阶段掌握的技术信息相对较少,这必然会对最终的安全评价工作造成较大的影响,可能引起评价结果的失真;其次,存在较强的主观判断性,使得安全评价的主观性受到影响;最后,当前采用的指数评价方法几乎都是建立在统计分析数学方法之上,虽然统计具有较强的严格性,但实际采集到的数据却并不是十分的准确,其中许多数据依靠猜测获得,这也将影响最终评价的准确性。

#### 4. 本质安全的换热网络优化设计

换热网络(Heat Exchanger Network, HEN)通过合理分配工艺物流的能量达到提高能源利用效率的目的,在高能耗的石油、化工、冶金等工业的节能和保护环境方面具有重要意义[22]。多年来,人们提出了许多换热网络优化的方法,主要是拓扑修正和增加传热面积。然而,拓扑修正和附加传热面积的安装会导致不安全的改造,所以本质安全的换热网络优化设计就显得尤为重要[23]。换热网络的本质安全是指利用换热介质或换热过程本身固有的属性消除或减少有害物质或危险操作,而不是通过添加额外的保护设备和程序去控制和管理危害[24]。

化工过程的换热网络优化设计主要研究流股换热匹配、换热设备安排等方面的问题,需要考虑流股间温度和时间上的匹配[25]。Chan 等[26]提出,通过评价换热网络中每股物流的本质安全指数,在改进的流股温焓图的上进行流股匹配,采用的原则是把高本质安全评价的热流股和高本质安全评价的冷流股匹配。该方法的缺点是:在解决大规模问题时流股温焓图将变得复杂。Xia Liu 等[27]提出,换热网络安全问题需要考虑管道、换热器和换热流股等的影响。利用发生事故的可能性与严重性的乘积来评估换热过程在设备、流股和潜在热损失等方面的风险,结果显示间接热交换过程具有更小的风险。Zaini 等[28]从 Aspen HYSYS 中提取化工过程信息,然后评估流股易燃性和易燃物质质量、爆炸参数、潜在损失是否可接受,不可接受则对换热网络进行优化改进。Pasha 等[29]提出采用本质安全指数方法评价换热器和换热网络的本质安全水平,识别出安全性最低的换热器。此外,对管壳式换热器的本质安全指数值的正态分

布进行了假设性检验,损坏的管壳式换热器的高本质安全指数可能会造成正态分布的异常。近年来,许多可视化图形工具被提出并被广泛用作换热网络优化过程的辅助工具[30]。

以上研究大都是根据本质安全评价结果,针对企业本质安全水平较低的地方采取改进措施来优化换热网络,最终获得本质安全换热网络。这种评价方法的缺点是:应用本质安全原则的程度还不够深。所以,将本质安全与换热网络进行综合同步优化,同时权衡二者的利弊以获得本质安全的换热网络将是一个重要的研究方向。

在进行本质安全与过程设计同步优化时,研究的难点在于如何将本质安全原则与过程设计进行集成。早期,有学者在设备布局优化过程中集成了本质安全原则。Jung 等[31]将厂区划分成多个网格,假设每个设备占据一个单独的网格,然后评估出每个网格内设备风险值,以潜在的火灾爆炸损失最小为目标函数,建立混合整数非线性规划模型(MINLP),通过评估出的风险地图,来优化危险化工过程单元。此外,Jung 等[32]也研究了有毒性释放设备的布局优化。以最小经济投入为目标函数,把本质安全集成到布局优化的方式是采用毒性概率暴露模型计算发生毒性事故死亡的可能性,采用重质气体扩散模型进行蒙特卡洛模拟计算发生事故的严重性。建立混合整数非线性规划模型(MINLP),获得毒性释放的最优布局。Diaz 等[33]通过考虑到一年中无风、大气稳定的情况占大多数,研究设备在无风、大气稳定的最差情况下的毒性释放的最优布局。Vazquez-Roman 等[34]在研究有毒性释放的设备最优布局时,模型增加考虑了风速、风向和大气稳定度对死亡风险的影响。随后,Jung 等[35]在安全方面同时考虑了流股相变和有毒性释放设备的安全布局,从而建立换热网络综合的混合整数非线性规划模型(MINLP)。

同时,许多学者以风险的可容忍性作为约束条件,考虑建立本质安全换热网络同步优化的数学模型。Nemet 等[36]通过对整个厂区的换热网络进行热集成优化,在评价每股物流时,运用风险矩阵的方法,将安全评价的结果分为高风险区、中风险区和低风险区。以全厂净现值最大为目标函数,通过建立安全风险评估和换热网络优化的混合整数非线性规划模型(MINLP),然后通过求解方程以获得本质安全的换热网络。Nemet 等[37] 2017年在换热网络综合时考虑本质安全,集成本质安全的方式是通过增加考虑不同换热器类型、换热方式带来的风险约束。其中,风险的可能性基于已知的历史数据,风险的严重性基于定量风险分析方法,以期净现值的增量最大为目标函数,建立混合整数非线性规划模型(MINLP)。该方法的缺点是:不同换热方式取相同的个体风险限值是不严谨的[38]。本质安全集成到过程综合的方式是以生产过程的物质质量为纽带,同时权衡生产与过程风险,这也增加了单个风险上限和整体风险上限作为约束的条件。Nemet 等[39]把定量风险分析方法集成到化工过程综合中,以税后利润最大为目标函数,用以建立甲醇生产过程综合和本质安全同步优化的混合整数非线性规划模型(MINLP)。

由于化工过程中流股的非连续性,使得换热网络优化设计是一类复杂的数学问题,具有约束条件多、参数繁多、模型复杂、求解难度高的特点[40]。对于这一类问题通常有两种求解思路,一是通过放宽约束、减少参数来简化模型以方便求解,二是根据模型特点建立有针对性地有效精准的求解策略。另外为了进一步实现化工过程热集成工业化应用,需要在节能的基础上尽量考虑换热网络的本质安全性。

## 5. 结束语

综上所述,化工过程的本质安全化技术的研究主要有本质安全的内涵和外延,本质安全原则的定性定量应用,本质安全指数评价方法的改进,本质安全评价模块开发及其过程的模拟优化等方面,本质安全的换热网络优化设计作为该技术在化工过程中的重要应用,体现出本质安全与过程综合集成。综合考虑研究现状及其演变脉络,得到如下结论:

1) 本质安全原则在应用时很难同时得到满足,对于复杂化工过程需要对过程的失效机理和综合评价方法进行深入的研究,同时,本质安全原则的应用要有新型过程和技术开发,如新原料、绿色反应路

径、新型催化剂等。此外,针对过程开发中阻碍本质安全原则应用的诸多因素,应探索有效的解决方案。

2) 现有的本质安全化指数评价方法种类繁多,很难建立一种绝对客观、可靠和全面的本质安全化指数评价方法,只能结合实际工艺过程特点,选择最合适的一种或几种评价方法,并对评价结果进行全面的复核,才能得到表征工艺过程本质安全的最优指标。

3) 本质安全化技术的应用效果必须通过化工过程来体现,这就要求把该技术应用于生产实践中。随着人们的不断研究,本质安全的换热网络优化技术已经在高能耗的化工领域得到了广泛的应用。探究如何把本质安全原则集成到换热网络优化过程中,如何建立并求解本质安全换热网络同步优化的数学模型是该技术的关键。

## 参考文献

- [1] 王杭州,邱彤,陈炳珍,等.本质安全化的化工过程设计方法研究进展[J].*化学反应工程与工艺*,2014,30(3):254-261.
- [2] 赵劲松.化工过程安全[M].北京:化学工业出版社,2015:1-7.
- [3] 闫海报,张如君.化工过程的本质安全化设计策略分析[J].*化工设计通讯*,2019,11(45):186-190.
- [4] Kletz, T.A. (1978) What You Don't Have, Can't Leak. *Chemical Industry*, **10**, 287-292.
- [5] Kletz, T.A. (2003) Inherently Safer Design—Its Scope and Future. *Process Safety and Environmental Protection*, **81**, 401-405. <https://doi.org/10.1205/095758203770866566>
- [6] 葛春涛.化工过程本质安全原理及应用的研究进展[J].*化工技术与开发*,2014,43(10):26-30.
- [7] 张帆,徐伟,石宁.化工过程中的本质安全化设计技术研究进展[J].*安全、健康和环境*,2015,15(1):1-4.
- [8] Hendershot, D.C. (2006) An Overview of Inherently Safer Design. *Process Safety Progress*, **25**, 98-107. <https://doi.org/10.1002/prs.10121>
- [9] 陈炳珍.面向本质安全的化工过程设计研究进展[C]//王静康.中国工程院化工、冶金与材料工学部第七届学术会议论文集.北京:化学工业出版社,2009:24-28.
- [10] 叶昊天,董以宁,许爽,等.考虑本质安全的换热网络多目标优化[J].*化工学报*,2019,70(7):2584-2593.
- [11] Koller, G., Fischer, U., Hungerbuhler, K., et al. (2000) Assessing Safety, Health and Environmental Impact Early during Process Development. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **39**, 960-972. <https://doi.org/10.1021/ie990669j>
- [12] Rogers, R., Verwoerd, I.M., Bots, T., et al. (2004) How to Integrate She in Process Development and Plant Design. *Chemical Engineering*, **43**, 497-499.
- [13] Leong, C.T. and Shariff, A.M. (2008) Inherent Safety Index Module (ISIM) to Assess Inherent Safety Level during Preliminary Design Stage. *Process Safety and Environmental Protection*, **86**, 113-119. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2007.10.016>
- [14] Leong, C.T. and Shariff, A.M. (2009) Process Route Index (PRI) to Assess Level Explosiveness for Inherent Safety Quantification. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **22**, 216-221. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2008.12.008>
- [15] Shariff, A.M., Leong, C.T., Zaini, D., et al. (2012) Using Process Stream Index (PSI) to Assess Inherent Safety Level during Preliminary Design Stage. *Safety Science*, **50**, 1098-1103. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.11.015>
- [16] Gentile, M., Rogers, W.J., Mannan, M.S., et al. (2003) Development of a Fuzzy Logic-Based Inherent Safety Index. *Process Safety and Environmental Protection*, **81**, 444-456. <https://doi.org/10.1205/095758203770866610>
- [17] Srinivasan, R. and Nhan, N.T. (2008) A Statistical Approach for Evaluating Inherent Benignness of Chemical Process Routes in Early Design Stages. *Process Safety and Environment Protection*, **86**, 163-174. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2007.10.011>
- [18] Khan, F.I. and Amyotte, P.R. (2004) Integrated Inherent Safety Index (I2SI): A Tool for Inherent Safety Evaluation. *Process Safety Progress*, **23**, 136-148. <https://doi.org/10.1002/prs.10015>
- [19] Gupta, J.P. and Edwards, D.W. (2003) A Simple Graphical Method for Measurement of Inherent Safety. *Journal of Hazardous Materials*, **104**, 15-30. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(03\)00231-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00231-0)
- [20] 石晓伟,王达.化工过程模糊安全评价及其在过程开发中的应用[J].*广州化工*,2015,43(22):242-244.
- [21] 余金栉.不同化工过程本质安全评价方法的比较与分析[J].*石化技术*,2018,25(10):304.

- [22] 都健, 杨坡, 刘琳琳, 等. 带有热储罐的间歇过程换热网络综合[J]. 化工学报, 2013, 64(12): 4325-4329.
- [23] 肖武, 史朝霞, 姜晓滨, 等. 考虑管壳式换热器强化的换热网络综合研究进展[J]. 化工进展, 2018, 4(37): 1267-1275.
- [24] 霍兆义, 尹洪超, 赵亮, 等. 国内换热网络综合方法研究进展与展望[J]. 化工进展, 2012, 31(4): 726-731.
- [25] 孔令启, 张晓荷, 李玉刚, 等. 间歇化工过程热集成研究发展[J]. 化工进展, 2020, 39(10): 3849-3858.
- [26] Chan, I., Alwi, S.R.W., Hassim, M.H., *et al.* (2014) Heat Exchanger Network Design Considering Inherent Safety. *Energy Procedia*, **61**, 2649-2473. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.025>
- [27] Liu, X., Klemesa, J.J., Varbanov, P.S., *et al.* (2015) Safety Issue Consideration for Direct and Indirect Heat Transfer on Total Sites. *Chemical Engineering*, **45**, 457-459.
- [28] Zaini, D., Pasha, M. and Kaura, S. (2016) Inherently Safe Heat Exchanger Network Design by Consequence Based Analysis. *Procedia Engineering*, **148**, 908-915. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.500>
- [29] Pasha, M., Zaini, D. and Shariff, A.M. (2017) Inherently Safer Design for Heat Exchanger Network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **48**, 55-70. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.04.002>
- [30] 李宝红, 李继文. 采用换热器负荷图指导换热网络改造的新方法[J]. 化工学报, 2020, 71(3): 1288-1296.
- [31] Jung, S., Ng, D., Laird, C.D., *et al.* (2010) A New Approach for Facility Siting Using Mapping Risks on a Plant Grid Area and Optimization. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **23**, 824-830. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2010.06.001>
- [32] Jung, S., Ng, D., Lee, J.H., *et al.* (2010) An Approach for Risk Reduction Based on Optimizing the Facility Layout and Siting in Toxic Gas Release Scenarios. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **23**, 139-148. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.06.012>
- [33] Diaz-Ovalle, C., Vazquez-Roman, R. and Mannan, M.S. (2010) An Approach to Solve the Facility Layout Problem Based on the Worst-Case Scenario. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **23**, 385-392. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2010.01.004>
- [34] Vazquez-Roman, R., Lee, J.H., Jung, S., *et al.* (2010) Optimal Facility Layout under Toxic Release in Process Facilities: A Stochastic Approach. *Computers & Chemical Engineering*, **34**, 122-133. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.08.001>
- [35] Inchaurregui-Mendez, J.A., Vazquez-Roman, R., Ponce-Ortega, J.M., *et al.* (2016) Optimal Safe Layouts with Heat Exchanger Networks Synthesis Having Isothermal Process Streams. *Chemical Engineering*, **48**, 27-29.
- [36] Nemet, A., Klemes, J.J., Moon, I., *et al.* (2015) Safety Analysis Embedded in Total Site Synthesis. *Chemical Engineering*, **45**, 47-48.
- [37] Nemet, A., Klemes, J.J., Moon, I., *et al.* (2015) Synthesis of Safer Heat Exchanger Networks. *Chemical Engineering Transactions*, **56**, 1885-1890.
- [38] Nemet, A., Klemes, J.J., Kravanja, Z., *et al.* (2017) Heat Exchanger Networks Synthesis Considering Risk Assessment for Entire Network Lifetime. *Chemical Engineering Transaction*, **57**, 307-312.
- [39] Nemet, A., Klemes, J.J., Kravanja, Z., *et al.* (2017) Process Synthesis with Simultaneously Inherent Safety. *Chemical Engineering Transaction*, **61**, 374-379.
- [40] 吕俊峰, 肖武, 王开锋, 等. 换热网络多目标优化算法研究进展[J]. 化工进展, 2016, 35(2): 352-357.