

成本收益分析在 ALARP 原则中的应用

高永宜¹ 窦勇²

1. 诺力昂化学品（上海）有限公司；2. 英威达尼龙化工（上海）有限公司

摘要：风险控制需要科学合理地权衡社会资源投入，不能片面追求绝对安全而忽视效率。为此，我们可以借鉴财务管理中的成本收益分析，运用 ALARP（As Low As Reasonably Practicable）原则来进行运营过程中的风险管理。其要求比较风险控制的额外投入与减少的风险程度，通过边际效用等于边际成本时达到最优风险控制水平。运用 ALARP 原则有助于避免风险过度控制和控制不足，实现风险管理的效率最大化。

关键词：风险控制；成本收益分析；ALARP；边际效用

1 ALARP 原则的来源

ALARP（As Low As Reasonably Practicable）原则，是指将风险降低到合理可行的最低，其来源于一起由于 1947 年英国煤矿的矿井巷道支撑结构倒塌，而导致一名矿工约瑟夫·爱德华兹（Joseph Edwards）在事故中身亡的事例。后来在 1949 年法庭诉讼的过程中，爱德华兹的雇主国家煤炭委员会（National Coal Board）辩称，认为在矿井所有巷道内设置完整的支撑结构的成本太高，只能关注那些重点的部位。法官给出了最终的判决，在判决书中表示“必须进行计算，将风险的量控制于一个范围内，并采取必要的措施及成本（无论是时间、困难还是成本上）……”^[1]。自从这起爱德华兹的案件判决生效以来，在当前合理的费用和技术条件下，ALARP 原则已成为全球很多国家和地区在 HSE 风险管理和评价的重要组成部分^[2]。

我国 2007 年发布的国标 GB/T 21109.3《确定要求安全完整性等级的指南》，对 ALARP 原则的定义和模型等进行了详细地阐述。原安监总局在 2011 年发布的国家安全生产监督管理

总局令（40 号）《危险化学品重大危险源监督管理暂行规定》，阐述了可容许社会风险标准应采用 ALARP 原则作为风险可接受的判定原则。以及 2014 年发布的《危险化学品生产、储存装置个人可接受风险标准和社会可接受风险标准（试行）》中，对个人与社会可接受风险标准的范围给出了明确的定义。

2 ALARP 原则的意义

按照 ALARP 原则，如图 1 所示，这个图示把风险的高低划分了 3 个区域。

1) 在其顶部表示高风险，即不可容忍的风险区域，由于其风险太高无法接受或容忍，必须不惜一切代价把风险严重程度降低到可接受区域，否则，除非特殊情况，一般应放弃该机会以免得不偿失。若在设计阶段，该方案就不能通过审查；若是在役装置，必须立即停产整改。

2) 底部表示低风险，即可以接受的风险区域。对于落在底部区域的风险，由于其风险程度很低，完全能够忍受。因此，凡落入该区域的风险，无需采取专项风险防控措施。

3) 位于顶部与底部之间，也即高、低风险区域之间部分被称为可接受的风险区域，或 ALARP 区域，在这个区域应把风险控制在“（尽可能）低且合理可行”的水平，或称为“合理、实际且尽可能低”的水平，这意味着如果风险程度再进一步降低，其投入的风险防控措施费用将超过由此而获得的安全收益，即投入 > 产出；否则，风险程度还应进一步降低，直至投入与产出相抵。当然实际工作中，一般情况下，很难做到投入与产出刚好相抵，因为当风险降低到一定程度之后，可能就没有适用的风险防控技术，更何况还要把花费控制在一定范围内。因此，把风险控制在 ALARP 附近区域就比较合理，即“合理、实际且尽可能低”。

3 ALARP 原则的应用

ALARP 原则的在应用过程中，有些风险管理人员经常存在一些认识上的偏差，违背了“风险降低到合理可行的最低”的基本原则而误入歧途。包括：

1) 尽可能降低风险意味着必须不断提高标准。

2) 尽可能降低风险需要采取更多

的风险控制措施。

3) 尽可能降低风险就意味着不会发生事故。

4) 如果部分企业采用了更高标准的风险控制措施,那么该标准就是ALARP需要实现的。

然而,可接受的风险标准是一个接近量化的风险评价依据。在ALARP中可接受风险的限值,可以按下面的几个基本原则来确定。

1) 平等原则:在风险面前,所有人生命平等,包括自己的员工和外部的承包商人员,任何人都不能出现在过大的风险中,可接受的风险标准线就体现了生命的平等,生命高于一切经济利益。

2) 效用原则:在可接受的风险区域,我们对现场的采用成本收益分析进行风险决策,以确保安全资源使用的效益最大化。在平等原则的基础上来考虑经济的投入和产出,这样考虑了社会伦理和经济利益的两面性。

3) 技术原则:在当前的技术允许的条件下,我们应该优先采用最先进的风险控制措施,以降低并达到社会认可的低风险水平。

ALARP原则的一个常见的应用场景,如图2所示,是通过LOPA分析对安全仪表系统(SIS)进行定级的过程中,SIL等级的选择。而ALARP原则的分析中最为关键的步骤就是进行成本效益的CBA(Cost Benefit Analysis)分析。

成本收益分析法用于风险分析建议项的决策,如果要采取措施来降低风险,就要从项目的角度评估风险成本和应对措施的成本是否能接受,两者需要达到一定的平衡。

众所周知,安全措施改进会带来一定的投资和运行费用,而任何工厂均需要在市场环境中竞争,需要保持工厂运行的经济性。在现有文献中,虽然有部分研究提及使用成本分析法进行安全管理,如朱红^[3]在成本效益分析与石化安全管理决策中提出用成本分析法以

帮助安全管理抉择,但只针对工厂级别的安全管理决策;VIANELLO等^[4]提出使用成本收益分析用于帮助判断安装的收益;但以上研究均未涉及使用成本收益法帮助工厂在完成风险分析后,如何帮助管理层判断风险分析的行动项是否可行的问题。

本文引入工厂安全成本和安全效益的成本效益分析模式,对于可能发生人员伤亡或严重外界影响的情况,对每个确定的切实可行的风险降低措施的成本进行定量评估,并与由此可能实现的风险降低进行比较。并结合风险评估方法建立一套建议项评估的判断依据和流程,用数字化/可视化的方法帮助管理层迅速判断风险分析的行动项是否可行,从而实现安全和效益的平衡。

安全效益的成本效益分析方法就是计算风险降低措施避免死亡的隐含成本(ICAF),即风险降低措施的成本除以实现的风险,降低措施生命周期内潜在生命损失(PLL)的减少并将其与预防死亡的定义值进行比较。

当使用成本效益分析和ICAF时:

1) 确定每个处于尽可能降低风险区域(ALARP)和不可接受风险区域的情况下降低风险的可行措施。

2) 量化每个风险降低措施的财务成本和收益,以计算该措施的净成本。

其中,成本计算为用于实施建议项的全成本,包括:

a) 改造所需的一次性投资费用,如硬件购置费用和实施费用(设计、采购、土建、安装等)等(由于讨论措施实施时往往建议项尚处于一个非常粗略的状态,为简化计算,可以按照硬件购置费用的4倍估算实施费用)。

b) 生命周期内年运行/维护的费用(折现值),由于建议项实施后增加的年化运行费用,包括增加的公用工程、材料消耗、人工成本以及年度的校验/维护等费用。

安全收益主要来自避免事故发生的潜在成本,而收益的计算方式根据HAZOP/LOPA分析中对应场景不同,可能包括人员的伤亡费用、工厂停产/停业

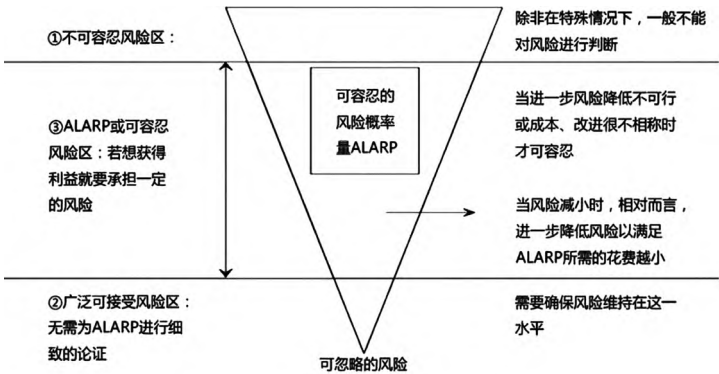


图1 ALARP原则图示

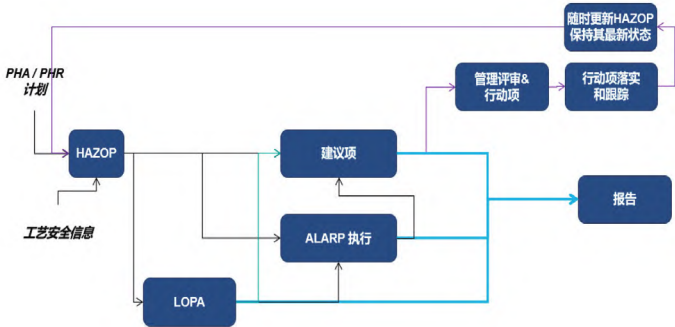


图2 ALARP在过程安全分析中的场景

费用、环境污染造成的后续处理费用等。

以热熔胶的配置为节点，包括丁酮进料、配置及丁酮溶剂清洗过程，工艺的流程如图 3 所示。

风险评估过程有一建议项，避免丁酮少加而导致反应釜爆聚，严重时会导致反应釜超温超压破坏，引起人员伤亡，具体分析如示例，见表 1。

LOPA 建议项内容：建议丁酮计量罐新增的远传液位指示与丁酮计量罐远传称重模块进行称重差值报警和无法启动下一顺序控制的顺控；同时工艺连锁由 DCS 控制改为 SIS 安全仪表系统来控制。

建议项成本分析：12 万元（=30 年 × 0.1 万 / 年 + 5 万 + 2 万 × 2），其中固定资产投资：5 万元（新增仪表 /SIS 卡件硬件费用 + 设计验证费用）年度维护测试费用：0.1 万元（年维护测试费用及定期更换费用摊销），生命周期内（按照新建工厂 30 年计算）更新硬件费用：2 万元 × 2 次全生命周期收益：22.275 万元。

•人员伤亡降低的潜在收益。

建议项实施后，年发生频率从 1.25×10^{-4} 降低到 1.25×10^{-6} ，每次可能产生两人死亡，全生命周期人员内人员死亡概率降低： $2 \times 30 \times 1.25 \times (10^{-4} - 10^{-6}) = 7.425 \times 10^{-3}$ 。

按当前每次人员伤亡会产生 200 万元经济损失计算，则本建议项因人员伤亡而带来的潜在收益为 14.85 万元（= $200 \times 7.425 \times 10^{-3}$ ）。

•减少可能的停产整改损失费用。

在目前高压形势下，一旦发生亡人事件，则至少会导致装置产生 3 ~ 6 个月停产整改，造成经济损失 200 ~ 400 万元。全生命周期内，该建议项会带来可能的停产损失减少为 $200 \times 30 \times 1.25$

$(10^{-4} - 10^{-6}) = 7.425$ 万元。

全生命周期内，人员伤亡降低和停车整改的损失费用降低而带来的潜在收益高于实施建议项的成本。

成本收益分析结论：实施该建议项数据的分析计算确实有些像做财务工作，这体现了安全从业人员需具备知识的系统性，风险评估本就结合了定性和定量的风险，定量的风险需要从业者有一定的可靠性知识基础、概率和统计学的知识，当然这些可作为工具知识，在基于失效率计算的风险分析时将会用到这些知识工具。简而言之，就是“性价比”。风险不可能完全消除，而风险降低措施需要成本，无论是经济、技术、人力以及管理，任何投入的边际效应在达到一定水平之后都会递减，也就是性价比递减。风险低可能性小的问题可以接受，中间地带的风险需要结合成本—收益去综合思考。

4 总结

综上所述，实践中应用边际分析确实存在一定的难处，需要协调多种资

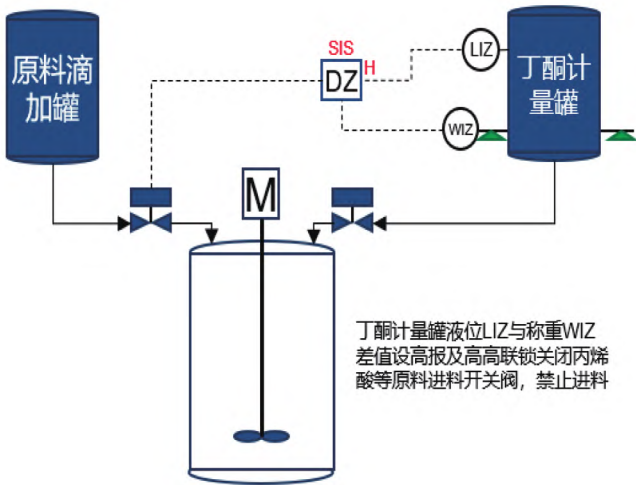


图 3 热熔胶配置的流程

源和机制，并跟其他的管理目标保持平衡，这样才能发挥其应有的效用。虽然有些风险降低的边际效益难以量化，但 ALARP 原则仍然是我们在进行风险控制和投入决策时的最基本依据。接下来随着大数据技术的进步和监管环境的不断地优化，一些高风险的行业应该主动有意积累更多的数据来对风险控制措施的边际效应进行量化。这无疑会推动风险管理事业向着更科学、更动态、更高效的方向迈进，进入一个崭新的发展阶段。

参考文献：

[1] Health and Safety Executive. Health and Safety at Work Act 1974 SI 1974/1439 [S]. London : The Stationery Office, 1974.

[2] Health and Safety Executive. Reducing risks, protecting people, R2P2 [M]. UK : HSE Books, 2001.

[3] 朱红. 成本效益分析与石化安全管理决策 [J]. 石油化工安全环保技术, 2016, 32(02):4-7.

[4] VIANELLO C, MILAZZO M F, MASCHIO G. Cost-benefit analysis approach for the management of industrial safety in chemical and petrochemical industry[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019, 58:116-123.

表 1 安全收益成本分析

起始原因	丁酮计量罐远传称重模块故障，测量值高于实际值	可能的后果	丁酮计量罐无或少丁酮加入；会导致进入反应釜的丁酮无或少量，会导致反应釜爆聚，严重时会导致反应釜超温超压破坏，引起人员伤亡
建议项实施前风险概率	1.25E-4	建议项实施后的风险概率	1.25E-6