

# 化工生产人工误操作危险与可操作性分析研究

高金吉, 王 峰, 张 雪, 杨剑锋, 王世达

(北京化工大学化工安全教育部工程研究中心, 北京 100029)

**[摘要]** 研究了危险化学品生产装置开、停车过程中人工误操作危险与可操作性分析系统, 可为防范人工误操作提供新的分析方法, 为防范事故提供技术依据。以吉林石化硝基苯初馏塔开车过程中由于人工误操作引发的爆炸事故为例进行了分析。

**[关键词]** 人工误操作; 危险与可操作性分析; 概率; 风险

**[中图分类号]** TP391.77 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2008)08-0035-05

## 1 前言

1984年美国联合碳化物公司印度农药厂的毒气泄漏事故<sup>[3]</sup>和2005年吉林石化爆炸事故都是由人工误操作引发的。人工误操作事故往往呈现“小概率、大危害”的特点。据统计, 约70%的安全事故与人为失误有关。1995年美国联邦职业安全与健康管理局通过了《过程安全管理标准 Title 29 CFR 1910.119》, 要求所有重大化工装置都要进行过程安全分析<sup>[4]</sup>。实践证明, 进行过程安全分析(process hazard analysis, PHA)可以预防事故, 消除隐患, 提高系统的可靠性和安全性。当前, 我国在化工生产危险与可操作性分析方面还没有法规, 技术及应用研究则刚刚起步。

目前还没有专门针对开、停车和应急阶段顺序颠倒、操作步骤遗漏的分析方法的报道。笔者介绍了自行开发的开、停车过程中人工误操作危险与可操作性(mistake operation-hazard and operability, MO-HAZOP)分析系统及其工程应用实例, 并应用该系统分别定量计算出所有的人工误操作顺序组合的发生概率值, 结合现有知识和专家经验, 判定事件发生的风险等级, 从而有重点地给出预防危险、保障

生产安全的建议, 避免人工误操作的发生, 或把人工误操作造成的危害和损失降到最低, 这对于石化企业的安全生产具有重要意义。

## 2 人工误操作危险与可操作性分析系统分析方法

化工企业开、停车, 以及应急事故处理措施都有一定的操作步骤。化学反应的温度和压力受多参数影响, 开车、停车和应急处理事故的步骤将实现物流输送、能量流交换和实现反应条件等目的, 人工误操作(步骤遗漏、顺序颠倒等)可能会导致设备不能稳定运转, 生产效率降低, 产品不合格, 甚至造成重大事故。

如对所有的误操作进行分析, 则必须将所有的步骤序号进行全排列, 针对每一个顺序组合分析其不利后果, 并给出指导建议。

这种分析方法完备性非常好, 但工作量非常大。例如, 某一操作有16个步骤, 全排列后的危险路径最多为20 922 789 888 000种, 显然是不切实际的。表1列出了1~16个步骤的全排列后得到的组合数结果。

**[收稿日期]** 2007-11-15

**[基金项目]** 国家科技支撑计划(2006BAK01B00)

**[作者简介]** 高金吉(1942-), 男, 辽宁本溪市人, 教授、博士生导师, 中国工程院院士, 设备诊断工程专家

表 1 不同步骤个数阶乘结果表

Table 1 The factorial results of different numbers of the procedures

数字	阶乘结果	数字	阶乘结果	数字	阶乘结果	数字	阶乘结果
1	1	5	120	9	362 880	13	6 227 020 800
2	2	6	720	10	3 628 800	14	87 178 291 200
3	6	7	5 040	11	39 916 800	15	1 307 674 368 000
4	24	8	40 320	12	479 001 600	16	20 922 789 888 000

虽然人工误操作是小概率事件,但在所有错误操作步骤排列组合中,每种组合顺序发生的概率大小不同。人工误操作危险与可操作性分析系统计算了发生可能性较大的误操作,并划分了各种顺序组合的风险等级。分析人员初步分析并确定操作步骤,利用 MO - HAZOP 分析系统计算得到各种错误操作顺序的发生概率,对所给出的操作步骤顺序进行风险分级,结合专家的知识 and 经验对风险等级高的误操作提出避免危险事故发生的措施和建议。

MO - HAZOP 分析系统的分析步骤如下:初步分析、确定操作步骤;输入操作步骤内容;排列组合、计算概率值;分析概率值大的顺序组合可能产生的不利后果,并对它们提出防范建议;风险分级;复查、输出分析报告。

2.1 初步分析、确定操作步骤

初步分析时要将每一个操作都作为一个步骤。操作规程中通常有注意检查仪表、联锁等安全检查步骤。无论它们顺序如何颠倒,都将增强生产的可靠性。为了减少分析的工作量,如下步骤可不参与排列组合计算分析:

某一步骤必须以另一步骤为前提,可以事先将它们顺序颠倒产生的不利后果总结性的单独写出。如塔的釜底若没有物料,就用再沸器加热,易烧坏设备、发生爆炸事故等步骤。

两个或更多步骤可以同时进行,顺序互换不会出现危险事故。

两个步骤是相同操作,步骤之间有相反的操作步骤。若将中间的相反步骤漏掉,则两个步骤无法重复实施。如打开阀门进料;塔的液位稳定在 60 %

时,关闭阀门;反应 30 min 后,继续打开阀门进料。又如若未关闭阀门,则可能导致塔内液位超高、满塔的危险事故,以致第二次打开阀门的操作无法实施。

依据上述判别方法,可以类比分析,在实际分析时可减少工作量。

2.2 排列组合、计算顺序组合发生的概率值

在开、停车过程中,遗漏一个步骤或颠倒两个步骤的顺序都有可能引发事故。把步骤全排列得到的报表相当庞大,因此在报表结果中找出最容易发生和最危险的误操作是一个值得探讨的重要课题。

假设开、停车的操作步骤有  $n$  条,利用 MO - HAZOP 分析系统对所有的步骤全排列,得到  $n!$  种组合。通过对全排列输出的结果研究发现:实际上很多顺序组合出现的可能性非常小。如操作工在实际第一步操作时就开始操作第 15 个步骤,发生的可能性非常小。

MO - HAZOP 分析系统基于一定规则,计算某一操作过程的全部排列组合发生概率值,并在表 2、表 3 中列出了顺序颠倒发生概率值在 0.6 以上的组合数。

表 2 2 ~ 10 步操作步骤顺序颠倒后发生概率值在 0.6 以上的组合数统计表  
Table 2 The probability value of the combination statistics is 0.6 above, from 2 to 10 procedures

概率值	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.6	2	6	24	76	163	295	483	739	1 076
0.7	2	6	20	41	70	108	156	215	286
0.8	2	6	11	17	24	32	41	51	62
0.9	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

表 3 11 ~ 20 步操作步骤顺序颠倒后发生概率值在 0.6 以上的组合数统计表  
Table 3 The probability value of the combination statistics is 0.6 above, from 11 to 20 procedures

概率值	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0.6	1 508	2 050	2 718	3 528	4 500	5 652	7 005	8 577	10 393	12 475
0.7	370	468	581	710	856	1 020	1 203	1 406	1 630	1 876
0.8	74	87	101	116	132	149	167	186	206	227
0.9	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

由表 2、表 3 可以看到,通过计算 2~20 个步骤顺序颠倒操作的概率值,可知顺序颠倒发生概率值在 0.6 以上的组合数少于全排列分析的组合数,经过 MO-HAZOP 计算可以找出发生误操作可能性大小的顺序。

利用 MATLAB 软件将不同步骤数的不同概率值拟合成曲线,可得到如下的关系式

$$y = 2.57208x^3 - 26.67544x^2 + 137.85052x - 233.4324 \quad (1)$$

概率值为 0.7 时:

$$y = 6.5206x^2 - 45.9912x + 93.588 \quad (2)$$

$$y = 0.5x^2 + 1.5x - 3 \quad (3)$$

$$y = x \quad (4)$$

式中,  $y$  为操作步骤组合数;  $x$  为操作步骤数。

不同操作步骤数、顺序颠倒发生概率值在 0.6 以上的组合数拟合曲线如图 1 所示。

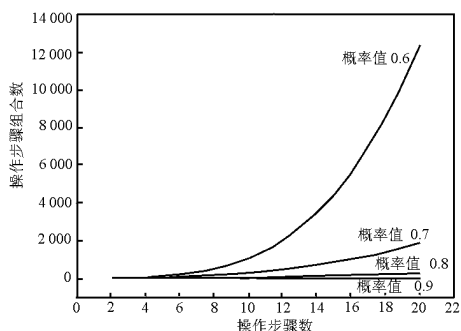


图 1 2~20 个步骤顺序颠倒概率值在 0.6 以上的组合数

Fig. 1 From 2 to 20, the number of combinations of reversal sequence whose the probability value is 0.6 above

由图 1 可以看出,4 条曲线由上往下,分别为概率值在 0.6、0.7、0.8 和 0.9 的曲线,随着操作步骤的增多,概率值越小,曲线的弧度越大,顺序颠倒错误操作的组合数越多。

从 MO-HAZOP 分析系统给出的结果可以得到以下结论:

1) 只存在两个步骤顺序颠倒的组合发生概率值最大;

2) 概率值随着顺序颠倒失误的增多而减小,出现的顺序颠倒失误越多,越不易出现;

3) 遗漏步骤越多的顺序组合,越不容易出现。

### 2.3 分析不利后果、确定事件的风险等级

由 MO-HAZOP 分析系统可以给出发生概率值大的顺序颠倒、遗漏步骤的组合。根据现有知识和

专家经验可以得到各种组合的可能性、严重度和不可探测度的大小。评分数值如表 4 所示。

表 4 可能性、严重度和不可探测度在风险判定中的评分表<sup>[5]</sup>

Table 4 Likelihood, severity and not detection probability values used in risk calculation

可能性 (likelihood)	严重度 (severity) 影响	不可探测度 (not detection probability)	评分
尤其不可能	没有影响	尤其可能探测到	1
细微的可能性	非常轻微影响	非常高的可能探测到	2
非常低的可能性	轻微影响	高度可能探测到	3
低的可能性	小影响	中等偏高可能探测到	4
中等偏低的可能性	中等影响	中等程度可能探测到	5
中等可能性	严重影响	中等偏低可能探测到	6
中等偏高的可能性	高度严重影响	低的可能探测到	7
高可能性	非常高的严重影响	非常低的可能探测到	8
非常高的可能性	特别高的严重影响	非常细微的可能探测到	9
尤其高的可能性	最大的严重影响	特别难探测到	10

对于顺序颠倒、遗漏步骤的组合,可利用公式(5)计算得到各组合的风险。

$$\text{风险 (risk)} = \text{可能性 (likelihood)} \times \text{严重度 (severity)} \times \text{不可探测度 (not detection probability)} \quad (5)$$

表 5 列出了不同的风险等级以及应对策略。根据公式(5)得到各组合风险的大小,划分风险等级<sup>[5]</sup>。利用 MO-HAZOP 分析系统对危险化学品生产装置开、停车过程进行分析后,可以对风险等级高的误操作采取防范措施,在一定程度上避免人工误操作“小概率、大危害”事故的发生。

表 5 风险等级对应改善措施建议<sup>[5-7]</sup>

Table 5 The risk rank and the safeguards

风险分类	风险等级	应对策略
低度风险	一级	放在最后改善、可接受
中低度风险	二级	稍后改善、暂时可接受
中度风险	三级	按顺序改善
中高度风险	四级	优先决定改善
高度风险	五级	立刻检查现有保护措施并进行方案改善或加强危险应急能力

对风险等级高的误操作可以如下措施以防止误操作。

1) 程序控制设施。程序控制应用于如果不按程序操作就会发生故障或导致极大危险的情况,如反应器等操作中。

2) 联锁机构。保证不按顺序操作就不能进行

控制阀的操作;ESD 紧急停车系统。

### 3) 联动机构。

## 3 应用 MO - HAZOP 软件分析吉化硝基苯初馏塔开车操作

文章以硝基苯精制岗位硝基苯初馏塔开车操作规程为例,介绍了 MO - HAZOP 分析系统的应用方法。

### 3.1 初步分析并确定操作步骤

- 1) 硝基苯初馏塔开车操作规程共 17 步。
- 2) 不可以遗漏但可以放在任何位置操作的步骤有 2 步。操作步骤数变为 15 步。
- 3) 有 2 个步骤是可以同时进行的,顺序可以互换。
- 4) 有 2 个步骤是相同的操作。

图 2 为 MO - HAZOP 分析系统步骤查询、修改界面,图中表格列举了初馏塔开车操作基本步骤。

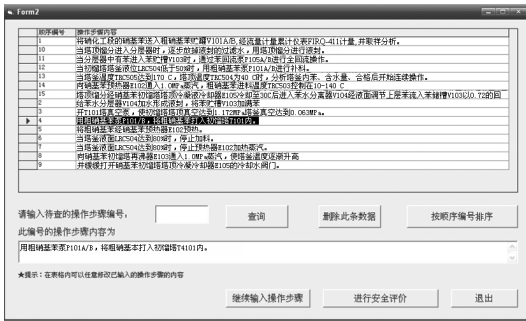


图 2 MO - HAZOP 步骤查询、修改界面

Fig. 2 The search and modification interface of MO - HAZOP program

### 3.2 全排列后计算顺序组合发生的概率值

表 6 和表 7 列举了利用 MO - HAZOP 分析中出现的部分顺序颠倒错误、步骤遗漏的组合风险等级分析结果。

表 6 顺序颠倒概率值统计表

Table 6 The statistics of sequences reversal probability value

概率值范围	1 ~ 0.9	0.9 ~ 0.8	0.8 ~ 0.7	0.7 ~ 0.6
顺序组合数	15	117	724	3 644

表 7 步骤遗漏数统计表

Table 7 The statistics of numbers of omissions of operation procedures

遗漏步骤数量	遗漏一步步骤	遗漏两步步骤
顺序组合数	15	105

利用 MO - HAZOP 分析系统分析吉林石化硝基苯初馏塔开车过程引发爆炸事故的人工误操作,由图 3 可知,当第 5 步和第 4 步顺序颠倒时,初馏塔前面的预热器加热水蒸气阀门打开,预热器温度上升,长时间加热,没有及时发现并关闭此加热水蒸气阀门,此时冷的硝基苯打入预热器,液相急剧地变为气相发生突沸,由于其密度减少到 1/100 ~ 1/1 000<sup>[6]</sup>,所以体积膨胀很大,压力迅速上升,这是爆炸事故的直接诱因。

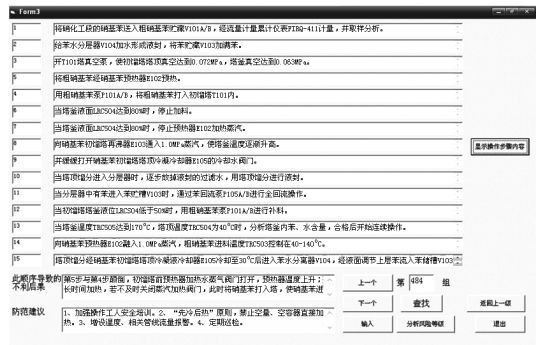


图 3 硝基苯初馏塔开车过程分析界面

Fig. 3 The analysis interface of the nitrobenzene prefractionator's startup period

利用 MO - HAZOP 进行预先分析,基于现有的知识,提出重点监测预热器温度的建议,增加预热器温度和进入预热器硝基苯流量的程序控制,增加报警点,避免预热器先加热、后进料,预防由于误操作引起的事故发生。

### 3.3 判定风险等级

根据现有知识和经验得到图 3 所示的误操作发生的可能性、严重度和不可探测度,根据公式(5)计算得到风险,并根据风险的大小判定风险等级,如图 4 所示。



图 4 判定风险等级页面

Fig. 4 The interface of the calculation of the risk rank

判定所有误操作的风险等级,得到误操作风险等级的高低顺序,对风险等级高的误操作采取有效的防范措施,如程序控制、联锁、联动和现代监测预警技术,可以有效防止事故的发生<sup>[8]</sup>。

## 4 结语

对危险化学品生产复杂系统的事故防范认识比解决问题更重要。MO-HAZOP分析系统可以应用于石油化工、电力、冶金等所有按步骤操作的行业开、停车和事故应急处理等各个阶段,可以对可能导致重大事故的误操作进行分析,有针对性地通过采用程序控制、联锁、联动机构和现代安全监测预警系统,有效防止事故的发生,对保障企业的安全生产具有重要意义。

### 参考文献

[1] 高金吉. 提高我国危险化学品生产重大事故防范能力势在必行[J]. 科技导报, 2006, 24(11):1

- [2] 高金吉, 杨剑锋. 工程复杂系统灾害形成与自愈防范原理研究[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(9):15-22
- [3] 廖学品. 化工过程危险性分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000
- [4] Venkatasubramanian Venkat, Zhao Jinsong, Shankar Viswanathan. Intelligent system for HAZOP analysis of complex process plants[J]. Computer and Chemical Engineering, 2000, 24:2291-2302
- [5] 朱启超, 匡兴华, 沈永平. 风险矩阵方法与应用述评[J]. 中国工程科学, 2003, 5(1): 93-98
- [6] Antonio C F Guimaraes, Celso Marcelo Franklin Lapa. Hazard and operability study using approximate reasoning in light-water reactors passive systems[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236: 1256-1263
- [7] 北川彻三. 爆炸事故的分析[M]. 黄九华, 刘培德译. 北京: 化学工业出版社, 1984
- [8] Kim Man Cheol, Poong Hyun Seong. A computational method for probabilistic safety assessment of I&C systems and human operators in nuclear power plants[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2006, 91(5):580-593

# The research of hazard and operability analysis about the manual mistake operation in chemical production

Gao Jinji, Wang Feng, Zhang Xue, Yang Jianfeng, Wang Shida

(Beijing University of Chemical Technology, Engineering Research Center of Chemical Technology Safety Ministry of Education, Beijing 100029, China)

[Abstract] The Manual Mistake Operation Hazard and Operability Analysis Program for startup period and stop period of the hazard chemicals plants, which is discussed in this thesis, should provide a new analysis method and adequate technological grounds for preventing the mistake operation. The explosion which occurred in the nitrobenzene prefractionator's startup period in Jilin Petrochemical Corporation is taken as an example to analyze in this thesis.

[Key words] manual mistake operation; hazard and operability analysis; probability; risk