

文章编号: 1673—9620 (2008) 03—0031—05

基于序列偏差的 HAZOP 分析^{*}

徐庆松, 王凯全, 袁雄军

(江苏工业学院 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 以往的危险性与可操作性分析 (HAZOP) 方法只考虑偏差与其可能引起事故的对应关系, 而忽略了偏差与其可能引起的另外一些偏差的对应关系, 忽略了可能形成的序列偏差集及其连锁关系, 因而难以全面、深刻认识偏差发展为事故的过程, 难以提高 HAZOP 分析的系统安全效果。将事故致因理论中连续变化观点的应用到 HAZOP 分析中, 提出了一种基于序列偏差的 HAZOP 分析程序, 在常规 HAZOP 分析的基础上构建序列偏差图, 以此确定各个偏差的重要度, 选择偏差控制策略。以某聚氯乙烯聚合工艺过程中的偏差“引发剂贮槽搅拌无”为示例, 应用该方法认清了偏差如何发展为事故, 如何选择控制策略, 预防事故发生, 达到系统安全的目的。

关键词: 危险性与可操作性分析; 变化; 序列偏差

中图分类号: X 937

文献标识码: A

A Model of HAZOP Study Based on Sequence Deviations

XU Qing—song, WANG Kai—quan, YUAN Xiong—jun

(School of Environmental and Safety Engineering, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213164, China)

Abstract: HAZOP in the past was concerned with only the relationship of deviations with its resulting accident, but did not involved whether it could lead to other deviations. The relationships between deviations and other deviations and the sequences formed by deviations in their chains are overlooked. So they can not recognize the process of accidents caused by deviations deeply and comprehensively, and then they can not improve the system safety effectively. Applying the point of view of continuous changes within the cause of the accident theory, this paper proposes a model of HAZOP study based on sequence deviations which can be applied to chemical process hazards identification. Sequence deviations diagram can be constructed on the basis of the routine HAZOP study, then, the important deviations will be selected according to their importance in the sequence. After that, control strategies will be established. The application of the methodology is illustrated by a PVC polymerization plant case. In the case, the sequence deviations diagram is established from the deviation of none of stirring of initiator tank. The result proves that this method can help to recognize the process of how deviations lead to an accident and how to choose the safety strategies, so the objective of system safety has been achieved.

Key words: HAZOP (hazard and operability analysis); variety; sequence deviations

危险与可操作性研究 (HAZOP) 是通过分析
化工生产运行过程中工艺状态参数的变动, 操作控

制中可能出现的偏差, 以及这些变动与偏差对系统的
影响及可能导致的后果, 找出出现变动和偏差的

^{*} 收稿日期: 2008—02—07

作者简介: 徐庆松 (1978—), 男, 河南人, 硕士, 注册安全工程师。

原因,明确装置或系统内及生产过程中存在的主要危险并提出预防措施的危险性评价方法。自 20 世纪 70 年代创立以来^[1],HAZOP 方法的进展主要体现在如何进行系统分析,指导人们更全面、快速、准确发现偏差并确定与其可能引起事故的对应关系方面。Ramesh Vaidhyathan 和 Venkat Venkatasubramanian^[2]1995 年提出基于有向图模型的 HAZOP 分析技术 (HAZOPExpert); Rajagopalan Srinivasan 和 Venkat Venkatasubramanian^[3]1996 年将 Petri 网模型与 HAZOP 分析 (BatchHAZOPExpert) 用于间歇工艺 HAZOP 分析; Horacia Leone^[4]于 1996 年提出基于知识的 HAZOP 研究方法; 综合分析模型 (Shankar Viswanatha, Nilay Shah 和 Venkat Venkatasubramanian^[5], 2000; F. Mushtaq 和 P. W. H. Chung^[6], 2000; Holger Graf, Henner 和 Schmidt — Traub^[7], 2000; Zhang Beike, Wu Chongguang, Xia Tao^[8], 2003)。

以变化为基础的事故致因理论不仅重视变化,而且认为事故是连续变化的结果^[9],形式上表现为事故因果连锁。如早期的海因里希、博德、亚当斯和后来的本尼尔^[10]和佐藤吉信^[11]均认为事故过程中包含一系列因果连锁关系,后来人们将这种连锁关系称为“事件链”。化工过程安全应注重对变化形式的表达,在认识化工事故过程的基础上预防事故。而目前的 HAZOP 方法尚存在不完备之处。HAZOP 只考虑了变化(偏差)与事故的对应关系,而忽略了变化(偏差)与新的变化(偏差)的对应关系,更忽略了构成系统变化(序列偏差)集及其连锁关系。

因此,将序列偏差的思想应用到 HAZOP 分析中能够表达化工过程变化的形式,有助于更全面、深刻地认识偏差发展为事故的过程,提高 HAZOP 分析的系统安全效果。

1 基于序列偏差的 HAZOP 分析

化工过程中的变化主要表现为工艺参数的“偏差”,因此,化工过程中的“事件链”就表现为偏差链,这里称为序列偏差。基于序列偏差的 HAZOP 该方法与常规 HAZOP 最大的不同是要将相互单独的偏差依据其因果连锁关系形成序列,从而找出序列偏差集及其连锁关系,根据偏差重要性排序,选择控制偏差的策略,防止偏差发生,提高

系统整体安全水平。

1.1 构建序列偏差图

(1) 结合工艺参数,在引导词的启发下找到基本偏差 D_i 可能引起的新偏差 D_{ij} ($j = 1, 2, \dots, k_i$),其中 k_i 为基本偏差 D_i 引起新偏差的种类,称 D_{ij} 为中间偏差;

(2) 如果中间偏差 D_{ij} 已经在常规 HAZOP 分析中被分析过,则引起 D_{ij} 的原因不仅包括基本偏差 D_i ,还应包括在常规 HAZOP 分析中获得的原因 C_{ij} ;且此中间偏差 D_{ij} 有事故后果 A_{ij} ;

(3) 根据上述分析,可绘出获得以触发原因集合 C (共 l 个元素)、偏差关系集合 D (共 $\sum_i k_i$ ($k = 1, 2, \dots$) 个元素)和事故集合 A (HAZOP 分析按照后果严重程度将事故分为 4 类,见表 1)构成的序列偏差图(图 1)。其中,触发原因集合 C 是能够产生各种偏差的触发因素的组合;事故集合 A 是各种偏差最终可能导致事故的组合;偏差关系集合 D 则反应了各种偏差之间的逻辑联系。

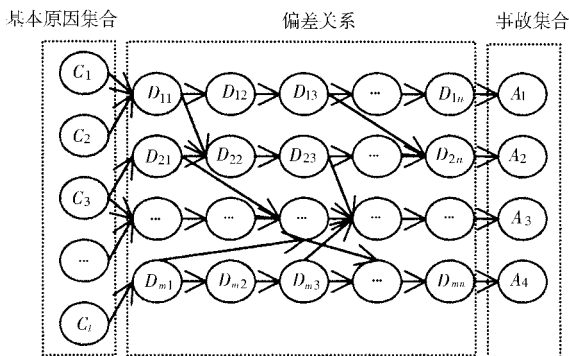


图 1 序列偏差图

Fig 1 Sequence deviations

为简化分析,假定原因偏差(引起结果偏差的偏差)之间是逻辑“或”关系,即每个原因偏差可单独作用引起结果偏差(由原因偏差引起的偏差)。同时为避免盲目分析,没有重点,偏差关系的建立应由工艺经验丰富的专家完成,分析沿工艺流程或操作步骤展开。如示例中的偏差关系主要依据引发剂在配制、投料、反应 3 个步骤中可能存在的偏差而建立。

序列偏差图清楚地表达了各种触发因素引起的偏差如何一步步发展为事故的过程。为了有效地预防事故,可以选取其中的重点偏差,采取安全措施控制其触发因素,切断偏差之间的联系。

表 1 偏差引起的事故后果分类

Table 1 Results classification of accidents been brought by deviations

后果严重度 <i>S</i>	事故类型	危害方式
IV	毒物泄漏	人员中毒, 健康危害, 人员伤亡
III	火灾、爆炸	易燃、易爆物质泄漏后温度高于闪点或自燃点, 发生火灾爆炸, 造成人员伤亡, 财产损失
II	停车、减产	设备故障或其他与工艺有关的原因引起质量降低、产量减小
I	生产波动	上下游工序受影响, 辅助工序波动

1 2 偏差重要性排序

决定偏差在序列中重要性的因素是偏差对事故的影响度 *F*、事故后果的严重度 *S*。

1 2 1 偏差影响度 *F*

图 1 是以 {*C*, *D*, *A*} 为点集、以各点之间的关联为弧集构成的有向图。根据图论^[12] 的定义可知, 如果图中某个触发因素 *C_i* 或偏差 *D_{ij}* 与某种事故 *A_j* 关联, 则存在以 *C_i* 或 *D_{ij}* 为始点, 以 *A_j* 为终点的弧; 如果图中某个触发因素 *C_i* 或偏差 *D_{ij}* 与多种事故 *A_j* 关联, 则存在以 *C_i* 或 *D_{ij}* 为始点, 以多个 *A_j* 为终点的弧。显然, 具有较多弧的偏差对事故的影响度较大。

因此, 可以建立以行表示事故, 列表示触发因素和偏差的关联矩阵^[13]。矩阵中的元素 *r_{ij}* 根据触发因素 *C*、偏差 *D* 与事故 *A* 关系是否关联而取 0 或 1。即:

$$R=\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_1\sum_i k_i+1 \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_2\sum_i k_i+1 \\ r_{31} & r_{32} & \cdots & r_3\sum_i k_i+1 \\ r_{41} & r_{42} & \cdots & r_4\sum_i k_i+1 \end{pmatrix} \tag{1}$$

式中 $r_{ij}=\begin{cases} 0 & C、D \text{ 与 } A \text{ 不关联} \\ 1 & C、D \text{ 与 } A \text{ 关联} \end{cases}。$

显然, 不考虑事故之间的差别, 偏差影响度 *F* 可以定义为触发因素 *C*、偏差 *D* 对事故 *A* 关联次数之和, 即:

$$F_i=\sum_{j=1}^4 r_{ij} \quad (i=1, 2, \cdots, \sum_i k_i+1) \tag{2}$$

1 2 2 事故后果严重度 *S*

取等比数列 8、4、2、1 表示表 1 中各类事故严重度差别, 则相应的 *S* 归一化为:

$$S=(s_1, s_2, s_3, s_4)=\left[\frac{8}{15}, \frac{4}{15}, \frac{2}{15}, \frac{1}{15}\right]= (0.533, 0.267, 0.133, 0.067) \tag{3}$$

综合考虑 *F* 和 *S*, 有:

$$T=S\times R=$$

$$(S_1, S_2, S_3, S_4) \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_1\sum_i k_i+1 \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_2\sum_i k_i+1 \\ r_{31} & r_{32} & \cdots & r_3\sum_i k_i+1 \\ r_{41} & r_{42} & \cdots & r_4\sum_i k_i+1 \end{pmatrix} \tag{4}$$

式中 *T*= (*t*₁, *t*₂, ..., *t* _{$\sum_i k_i+1$}) 表示触发因素 *C* 或偏差 *D* 偏差在序列中的重要度, 根据重要度大小, 可以有重点地选择控制偏差的策略。

1 3 选择偏差控制策略

对偏差的控制策略与一般事故的控制技术措施有所不同。偏差的控制可以选择两种方式, 一是防止偏差形成, 要对造成偏差的诱发因素采取防范措施; 二是消除偏差后果的影响, 防止其引发新的偏差甚至造成事故。若对偏差的所有控制措施均不能发挥作用, 则需要采取避免或减少事故损失的安全技术措施。

2 分析实例

2 1 工艺概述

某氯乙烯悬浮聚合过程采用间歇生产方式, 如图 2 所示, 生产过程可以分为助剂配制、投料、反应、出料 4 个过程^[15], 分别为: ①助剂配制: 配制符合浓度要求的缓冲剂 (NaHCO₃)、分散剂 (HPMC 与 PVA 混合)、引发剂 (EHP 与 TX-99 混合) 和终止剂; ②投料: 将单体 (VCM)、软水、各种助剂 (除终止剂) 按照规定的配方量和顺序加入聚合釜中; ③反应: 投料完毕开启搅拌, 冷搅拌 (未加热之前) 至规定时间, 然后启动升温程序将聚合釜加热至规定反应温度, 转入恒温控制, 聚合反应在恒温下进行, 直至聚合釜压力下降至规定数值; ④出料: 加入终止剂, 搅拌规定时间后用出料泵将浆料打至出料槽。

2 2 常规 HAZOP 分析

选择有代表性的偏差, 说明如何按照前面的流

程实施分析。以引发剂配制过程出现的偏差“引发剂贮槽搅拌无”为例，分析其在助剂配制、投料、反应 3 个过程中的发展、变化引发的其他偏差、事

故，以及它们之间的关系（因引发剂的影响不可能持续到出料过程，故不作分析）。分析得到触发原因、偏差和事故见表 2，形成的序列如图 3 所示。

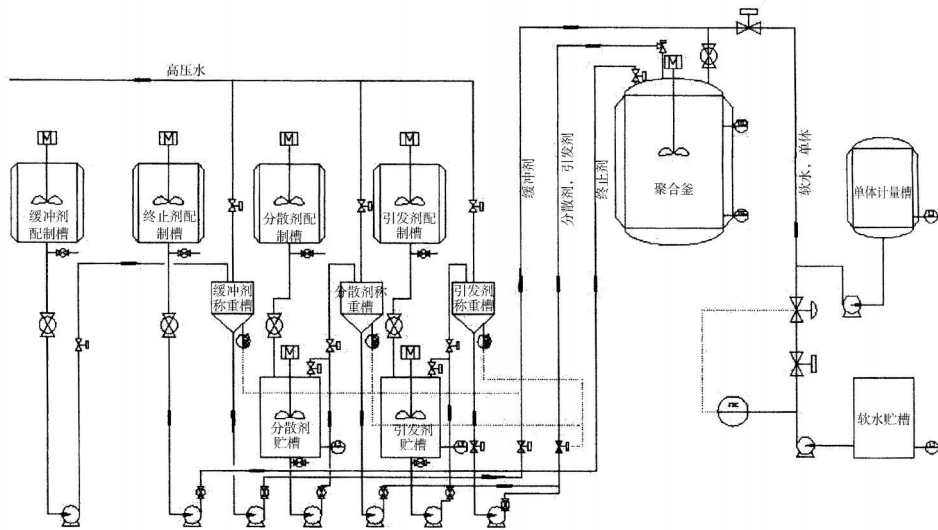


图 2 聚合工艺流程简图

Fig 2 Process diagram of polymer unit

表 2 触发原因、偏差和事故代号及说明

Table 2 Code and description of trigger reasons, deviations and accidents

项目号	项目说明
C ₁	操作失误
C ₂	搅拌电机故障停机 ¹⁾
C ₃	引发剂破乳
C ₄	人工投料计量失误
C ₅	称重槽故障
D ₁₁	引发剂贮槽搅拌无
D ₁₂	引发剂浓度分布不均
D ₁₃	投入聚合釜中引发剂过量
D ₁₄	反应速度过快
D ₁₅	聚合釜压力过高 ²⁾
D ₂₁	引发剂分析浓度偏差大 ³⁾
D ₂₂	聚合釜温度偏高
D ₂₃	循环水供应不足
D ₃₁	引发剂称重误差
A ₁	引发剂失效，无法使用
A ₂	粗料 ⁴⁾
A ₃	树脂转型 ⁵⁾
A ₄	爆聚 ⁶⁾ ，单体冲破爆破片，大量泄漏

说明：1) 引发剂贮槽搅拌应处于常开状态；2) 聚合釜设计压力 1.2 MPa；3) 受分析方法影响，引发剂浓度在 5%~7% 之间分析较准确，超过此浓度范围，分析误差增大；4) 聚合反应过快，快速聚合的悬浮小液滴迅速黏结在一起形成异于正常尺寸的大颗粒，导致产品质量不合格；5) 树脂转型：生产出的树脂牌号（以平均分子量划分）与计划生产牌号不符，聚氯乙烯分子量由聚合恒温控制阶段的温度决定，温度发生 2℃ 的偏差就会引起转型事故。6) 聚合反应失控，处于沸点以上的单体短时间内迅速聚合，放出大量的热，导致单体大量气化，聚合釜温度压力急剧上升。

2.3 触发原因及偏差重要性排序

序列偏差图中的触发原因和偏差构成集合 $D = \{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, D_{11}, D_{12}, D_{13}, D_{14},$

$D_{15}, D_{21}, D_{22}, D_{23}, D_{31}\}$ 事故集合 $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$ ，该事故集的后果严重度分别为： $S_1 = 0.067, S_2 = 0.133, S_3 = 0.133, S_4 = 0.533$ 。 D 中的触发原因及偏差与 A 中的事故之间的关联矩阵为： $R =$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

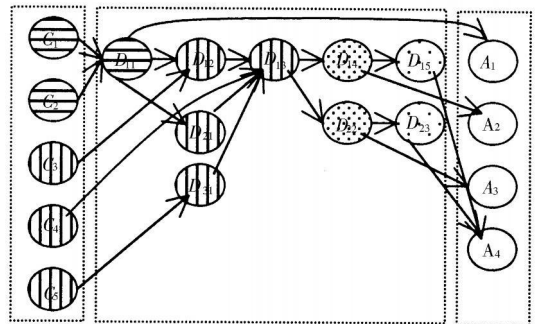
$$T = (0.067, 0.133, 0.133, 0.533)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

基本原因集合

偏差关系

事故集合



重要性排序：⊖最高 ⊕高 ⊙低 ⊖最低

图 3 以 D_{11} 为起始偏差的序列偏差图

Fig 3 Sequence deviations derived from the original deviation “ D_{11} ”

经计算得到 D 中各触发原因及偏差在序列偏差中的重要度, 结果如表 3 所示。按照重要度大小

将触发原因及偏差的重要度分为最高、高、低、最低, 图 3 中以不同的标记表示。

表 3 触发原因及偏差在序列中的重要度

Table 3 Important index of trigger reasons and deviations in sequence

触发原因及偏差	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	D_{11}	D_{12}	D_{13}	D_{14}	D_{15}	D_{21}	D_{22}	D_{23}	D_{31}
重要度	0 866	0 866	0 799	0 799	0 799	0 866	0. 799	0 799	0 666	0 533	0 799	0 666	0 533	0 799

根据重要度大小, 对触发原因和偏差的控制顺序为: ①优先控制的触发原因为 C_1 和 C_2 , C_1 和 C_2 不发生则 D_{11} 得到控制; ②其次应控制的触发原因为 C_3 、 C_4 和 C_5 , 偏差 D_{31} 由 C_5 所引起, 不用单独控制, 偏差 D_{12} 、 D_{13} 和 D_{21} 由触发原因及偏差 D_{11} 引发, 也不用单独控制; ③优先级别的控制对象为 D_{14} 和 D_{22} ; ④选择以上控制对象之后, 整个序列偏差无法形成, 若以上对象选择控制策略的难度较大, 则最后考虑控制中间偏差。

程, 明确应采取的安全措施。

2 4 选择偏差控制策略

参考文献:

依据上述触发原因及偏差的重要度排序, 可以选择如表 4 所示的控制策略, 防止偏差序列的形成, 进而预防事故发生。若表 4 中的措施不能发挥作用, 则应采取减少事故损失的安全技术, 包括个体防护、薄弱环节、避难与救援等^[9]。

表 4 安全策略

Table 4 Security strategies

控制对象	安全措施
C_1	安全教育、培训
C_2	定时设备巡检, 增加搅拌机运转信号指示
D_{11}	不需单独策略, 控制 C_1 、 C_2 即可防止 D_{11} 发生
C_3	引发剂贮槽温度指示及报警 (超过 5°C 报警)
C_4	入料程序连锁, 禁止人工投料
C_5	定期校验、检修称重槽
D_{31}	不需单独策略, 控制 C_5 即可

[1] Trevor A Kletz. HAZOP—past and future [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1997, 55: 263—266.

[2] Ramesh Vaidhyathan, Venkat Venkatasubramanian. Digraph—based models for automated HAZOP analysis [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1995, 50: 33—49.

[3] Rajagopalan Srinivasan, Venkat Venkatasubramanian. Petri net—digraph models for automating HAZOP analysis of batch process plants [J]. European Symposium on Computer Aided Process Engineering, 1996, 20 (6): 719—725.

[4] Horacia Leone. A knowledge—based system for HAZOP studies [J]. European Symposium on Computer Aided Process Engineering, 1996, 20 (6): 369—374.

[5] Shankar Viswanatha, Nilay Shah, Venkat Venkatasubramanian. A hybrid strategy for batch process hazards analysis [J]. Computers and Chemical Engineering, 2000, 24: 545—549.

[6] Mushtaq F, Chung P W H. A systematic Hazop procedure for batch processes and its application to pipeless plants [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2000, 13: 41—48

[7] Holger Graf, Henner, Schmidt—Traub. An integrated approach to early process hazard identification of continuous and batch plants with statechart modeling and simulation [J]. Computers and Chemical Engineering, 2001, 25: 61—72.

[8] 李安锋, 夏涛, 张贝克. 化工过程的 SDG 建模方法 [J]. 系统仿真学报, 2003, 15 (10) 1 394—1 397

[9] 隋鹏程, 陈宝智, 隋旭. 安全原理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.

[10] 王凯全. 石油化工流程的危险辨识 [M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2002.

[11] 王若青, 胡晨. HAZOP 安全分析方法的介绍 [J]. 石油化工安全技术, 2003, 19 (1): 19—22.

[12] 运筹学编写组. 运筹学 [M]. 第 1 版. 北京: 清华大学出版社, 1982.

[13] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用 [M]. 第 3 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006.

[14] Ramesh Vaidhyathan, Venkat Venkatasubramanian. A semi—quantitative reasoning methodology for filtering and ranking HAZOP results in HAZOP Expert [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1996, 53: 185—203.

[15] Shankar Viswanathan, Nilay Shah, Venkat Venkatasubramanian. A hybrid strategy for batch process hazards analysis [J]. Computers and Chemical Engineering, 2000, 24: 545—549.

3 结 论

①将变化论思想应用到 HAZOP 分析过程, 分析偏差在连续变化过程中引起的其他偏差和事故, 进一步认清偏差发展为事故的过程, 是一次理论与实践结合的尝试。②建立基于序列偏差的 HAZOP 分析程序, 构建序列偏差图, 以序列偏差图表达偏差连锁形成事故的过程。依据偏差重要度排序结果, 选择重点偏差加以控制, 可以提高系统安全性。③以某聚氯乙烯聚合工艺为例, 对基于序列偏差的 HAZOP 方法作了完整的分析实践, 构建了由触发原因、偏差关系和事故组成的序列偏差图, 依据触发原因及偏差的重要度确定控制顺序, 清楚地认识到由偏差的发展变化导致事故发生的过程