

# 化工园区事故多属性决策模型研究

杨继星<sup>1</sup> 任延煜<sup>1</sup> 宋重阳<sup>2</sup> 房玉东<sup>1</sup>

(1. 国家安监总局通信信息中心; 2. 北京科技大学)

**摘要** 化工园区发生事故后,快速准确地采取应急决策方案对于降低事故危害程度十分重要。由于园区内部具有高密度危险品及反应装置,一旦某处发生事故,极有可能引起连锁爆炸。决策时受多种属性因素制约,就会产生多种决策方案。为减少次生事故发生,需要决策者客观、迅速且准确的采取行动。为此笔者提出了化工园区多属性决策方案优选模型,以确定最优的应急决策行动。案例研究表明,该模型能提高化工园区事故应急决策的客观性。

**关键词** 化工园区 多属性决策 方案优选 应急决策

## 0 引言

化学工业园是化学工业发展的必然方向,对于规范管理众多小规模企业以及设置准入门槛有十分重要的意义。然而在我们享受集中化管理模式带来的产业效益的同时,同样承担了较高的管理风险水平。

化工园区内往往具有很多化学品储罐,包含了数目巨大的易燃易爆危险品。一旦某处发生事故,很可能造成连锁反应,形成次生灾害,给整个园区及周边场所带来极其重大的危害。如2010年1月中石油兰州石化公司316储罐装置区发生重大火灾爆炸事故,爆炸进而引发了周边十一个储罐相继发生爆炸,共造成12人死亡。2012年2月,河北某工业园内发生重大连环爆炸事故,共造成25人死亡、4人失踪以及46人受伤,事故原因是某反应釜泄漏起火导致园区内部硝酸胍和硝酸铵爆炸。2015年6月,南京化工园区德纳化工厂发生火灾,现场连续多次爆炸,周边居民房子均有震感。很多实例都证明了化工园区发生事故极易引发多米诺效应,带来更为严重的后果<sup>[1]</sup>。

## 1 多米诺效应机理

多米诺效应指的是在多元素的系统内部,一个很小的事件在特定条件下诱发成为一系列连锁反应的现象。在化工园区中多米诺事故是指某个设备单元发生事故时,产生的爆炸碎片、冲击波和热辐射对周围的工艺装置和设备单元造成影响。当其作用强度超过安全阈值时,就会引发二次事故。其典型的事故类型有<sup>[2]</sup>:易燃物料、可燃气体的泄漏,生产装置超压爆炸,装置遭遇雷击及静电起火,过热液体溢沸和含能物质爆炸等。

爆炸碎片、爆炸冲击波和火灾热辐射被领域内研究学者称作诱发多米诺事故的主要致损因子<sup>[3]</sup>,笔者认为爆炸碎片可对容器、装置、管道造成穿透影响。其中高温碎片也可

能产生爆燃的危险。爆炸冲击可能使装置钢结构发生屈服、破裂、倒塌的危险，还可造成管线移位、安全保护装置失效等现象。火灾热辐射可导致压力容器内压升高、反应釜罐体强度降低以及达到物料燃点造成火灾等事故。

通过许多事故案例可以看出<sup>[4]</sup>，只有当初始事故造成的影响可作用于二级单元并且强度超过安全阈值时，才能引发二次甚至三次事故。在满足传播条件时会持续发展直至作用强度低于安全阈值时停止<sup>[5]</sup>，对应的事故模型如图1所示。

通过模型分析认为，一次事故可对多个设备单元造成影响，产生二次事故的单元具有不确定性，需要满足该影响强度超过设备单元的安全阈值。例如化工厂内反应釜超压爆炸，该设备周边还有精馏塔、异丙醇储罐、油气分离器和冷却装置。

产生的热辐射和爆炸碎片容易引发异丙醇储罐爆炸，此时异丙醇储罐就被称作二次单元，发生的事故被称作二次事故。

因此，在化工园区某一事故发生时，为避免次生事故的发生，结合二次事故设备单元的不确定性，应急决策方案需要考虑的因素就会受到多个属性制约。例如隔离设备单元A、隔离设备单元B、隔离设备单元C、挽救作业人员生命、减少环境污染以及减少经济损失等。如何客观准确的优选决策方案将成为类似事故应急决策的关键。为解决上述问题，笔者提出一种多属性决策问题优选模型。希望能在化工园区发生事故时，通过综合考虑多种决策属性，快速准确的提出解决方案，减少次生事故发生的可能性，降低事故危害。

## 2 决策方案优选方法

### 2.1 多属性决策方法

对于此类复杂的决策问题，首先确定合适的决策属性，可以理解为事故处理希望达到的目的（如减少环境污染、避免精密仪器损坏等）。当决策属性很多时，需要通过主观判断确定几个主要的决策属性，用  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $\dots$ 、 $C_m$  表示。其次需要列举出备选的方案，用  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $\dots$ 、 $A_n$  表示。具体方案见表1。

$E(C_j(A_i))$  (其中  $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ ) 表示第  $j$  个决策属性下第  $i$  个应急方案的评价值。 $E(C_j(A_i))$  的确定方法由决策属性的性质决定，大体分为两种。其一，当第  $j$  种决策属性可定量评价时（如距离初始事故距离，燃点），其评价值按照实际情况客观描述即可。其二，当第  $j$  种决策属性只能定性评价时，可邀请多名专家进行投票或打分评价，比较某种决策属性下不同方案能达到的期望效果。

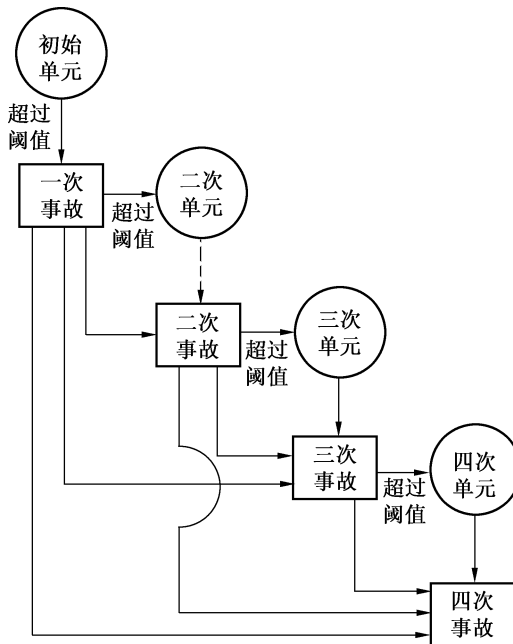


图1 多米诺事故模型

表1 多属性决策问题

应急方案	决策属性			
	$C_1$	$C_2$	...	$C_m$
$A_1$	$E(C_1(A_1))$	$E(C_2(A_1))$	...	$E(C_m(A_1))$
$A_2$	$E(C_1(A_2))$	$E(C_2(A_2))$	...	$E(C_m(A_2))$
...	...	...	...	...
$A_n$	$E(C_1(A_n))$	$E(C_2(A_n))$	...	$E(C_m(A_n))$

通过不同方案的评价值可用不同方法计算出每个方案的属性权重  $w_j^c$ ，进而得出每个方案的评价值  $z_i$ ，该评价值是综合考虑不同方案在多个决策属性下所表现出的期望效果，具有客观准确的交互性。通过比较不同方案评价值，可决定在综合考虑几种决策属性的前提下，具体应该实施的方案。

### 2.2 确定属性权重

确定属性权重的方法可以分为主观法和客观法，主观法包括专家评价法、经验估算法；客观法包括熵权法、变权法、离差法等。客观法相对排除了主观性的干扰，更为科学准确。但是客观法不同计算模型各有特点，计算结果也不尽相同，本文基于评价值偏离程度的思想，加入对决策属性数量的考虑，形成新的客观评价决策方案的模型并进行实例验证。

#### 1. 消除数据量纲

为将所有评价值归一化到  $[0, 1]$ ，目的是消除量纲影响，参考权重计算方法进行计算：

$$E'(C_j(A_i)) = \frac{E(C_j(A_i))}{\sum_{i=1}^n E(C_j(A_i))} \quad (1)$$

#### 2. 确定每个属性乐观评价值和悲观评价值

通过乐观评价值和悲观评价值可判断出每个评价值的偏差（重要）程度。

乐观评价值  $E^+ = (E_1^+, E_2^+, \dots, E_m^+)$  (2)

悲观评价值  $E^- = (E_1^-, E_2^-, \dots, E_m^-)$  (3)

$$E_j^+ = \begin{cases} \max_{1 \leq i \leq n} \{E'(C_j(A_i))\}, & j \in J_1 \\ \min_{1 \leq i \leq n} \{E'(C_j(A_i))\}, & j \in J_2 \end{cases} \quad (4)$$

$$E_j^- = \begin{cases} \min_{1 \leq i \leq n} \{E'(C_j(A_i))\}, & j \in J_1 \\ \max_{1 \leq i \leq n} \{E'(C_j(A_i))\}, & j \in J_2 \end{cases} \quad (5)$$

其中  $J_1$  为正向属性，例如避免的经济损失； $J_2$  为负向属性，例如救灾行动成本。

#### 3. 决策属性离差计算

标准差公式通常可用于观察数据值的差异值，广泛地用于统计学中不同数据差异衡量时使用。采用标准差公式求解悲观评价值与乐观评价值的“距离”较为准确，同时采用几何平均值可以更为准确的表明“距离”之间的关系。

$$d_j^+ = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (E'(C_j(A_i)) - E_j^+)^2} \quad (6)$$

$$d_j^- = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (E'(C_j(A_i)) - E_j^-)^2} \quad (7)$$

$$\varepsilon_j = \frac{d_j^+}{\sqrt{d_j^+ d_j^-}} \quad (8)$$

#### 4. 决策属性权重计算

$\varepsilon_j$  数值越大, 离差则越大, 表示决策属性越重要, 符合属性权重决策的通用规则。

$$w_j^c = \frac{\varepsilon_j}{\sum_{j=1}^m \varepsilon_j} \quad (9)$$

### 2.3 决策方案选取

利用决策属性的权重和评价价值确定应急方案的评价价值, 方案评价价值越大, 则效果越好, 他们代表的意义均为正相关, 具体计算为:

$$z_i = \sum_{j=1}^m w_j^c E(C_j(A_i)), i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

### 2.4 验证多属性决策方案模型

为证明笔者提出的多属性决策方案模型具有参考价值, 以文献 [6] 中报道的化工厂氯气泄漏事件为例, 控制泄漏的同时需要对周边人员进行疏散, 此时就会面临多种决策方法, 需要对其进行优选。方案中决策属性评价价值由内部专家在单一考虑某个决策属性前提下, 横向比较不同方案给予分数。

事故现场救援指挥部根据氯气泄漏事故的应急决策特征确定了决策的 3 个基本属性。 $C_1$  表示人员的心理影响;  $C_2$  表示救援决策成本;  $C_3$  表示被困人员的安全状态。其中  $C_1$  和  $C_2$  是负向属性;  $C_3$  是正向属性。制定了 6 套应急方案, 分别是隐蔽  $A_1$ 、疏散到近距离隐蔽场所  $A_2$ 、疏散到远距离隐蔽场所  $A_3$ 、先隐蔽后疏散到近距离隐蔽场所  $A_4$ 、先隐蔽后疏散到远距离隐蔽场所  $A_5$  和正常活动  $A_6$ 。多属性决策见表 2。

表 2 实例多属性决策问题

应急方案	决策属性		
	$C_1$	$C_2$	$C_3$
$A_1$	3	5	3
$A_2$	4	4	1
$A_3$	4	3	1
$A_4$	2	2	7
$A_5$	2	1	8
$A_6$	5	5	1

根据式 (1) 至式 (9) 计算得,  $w_j^c = (0.254, 0.312, 0.341)$ 。然后对 6 套方案评价价值进行排序, 排序结果见表 3。

表3 应急方案评价值结果

应急方案	评 价 值	排 序	应急方案	评 价 值	排 序
$A_1$	0.167	2	$A_4$	0.159	3
$A_2$	0.115	5	$A_5$	0.178	1
$A_3$	0.099	6	$A_6$	0.143	4

该事故案例经模型计算的最佳方案与对比文献 [6] 中相同, 从安全角度考虑, 先隐蔽等待救援队进行泄漏处理。当空气中有毒气体浓度下降到安全阈值内在进行疏散到远距离避难所, 此方法不仅成本较低、对被困人员心理影响小, 而且也能够保证被困人员安全。此案例实际处理结果也是按照先隐蔽后疏散到远距离的避难所方案实施, 因此可认为笔者提出的多属性决策方案优选模型具有参考价值。

### 3 结论

化工园区具有普遍性、复杂性和危险性等特点, 任何事故的发生都应引起高度重视。解决方案应全面考虑多种属性因素, 以防次生事故的发生并降低事故的危害。因此:

(1) 本文确定了多米诺事故模型, 认为当一次事故产生的影响作用于二级单元且作用强度超过安全阈值时, 才会引发二次事故, 多米诺事故并非一定发生。

(2) 针对化工园区事故的不确定性, 决策者会受到多个决策属性制约, 面临多个决策方案优选的问题。提出了面对此类多属性方案优选问题的算法模型。

(3) 对算法模型进行实例验证, 结果符合预期, 证实了该模型在多属性方案决策的情况下, 具有一定参考价值。

### 参 考 文 献

- [1] 陈明亮. 化工装置事故的多米诺效应定量分析关键问题研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2013.
- [2] 夏登友. 基于“情景一应对”的非常规突发灾害事故应急决策技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [3] 辛晶, 李向欣, 张鹏. 危险化学品泄漏事故应急防护行动优选[J]. 消防科学与技术, 2005 (2): 253 - 254.
- [4] 王媛婧, 王保民, 刘磊. 基于多米诺效应的化工园区储罐区池火灾风险分析[J]. 山西化工, 2015 (2): 73 - 75.
- [5] Alileche N, Cozzani V, Reniers G, et al. Thresholds for Domino effects and safety distances in the process industry: a review of approaches and regulations[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 143 (S1): 74 - 84.
- [6] Levy J K, Taji K. Group decision support for hazards planning and emergency management: a Group Analytic Network Process (GANP) approach [J]. Mathematical and Computer Modeling, 2007, 46 (7): 906 - 917.