

重大环境污染事故风险模糊排序方法研究

熊德琪, 陈 钢, 李 琼

(大连海事大学 环境科学与工程学院, 辽宁 大连 116026)

[摘要] 根据工厂重大环境污染事故风险评价呈多指标多层次结构, 且风险性排序具有相对性和模糊性的特点, 运用模糊集理论中的权距离和隶属度概念, 并将最小二乘法加以拓展, 提出能够有效解决此类多指标多层次排序或优选问题的模糊排序方法。用于对大连市4家重点工厂的事故风险性进行评价和排序, 评价结果合理、准确。

[关键词] 污染事故; 风险; 排序; 评价; 模糊

1 前言

许多工厂企业由于在生产过程中不同程度地使用、贮存或生产某些有毒化学品如氯气、煤气和苯等, 因此不可避免地存在着发生重大环境污染事故的隐患甚至已发生过重大污染事故。为了加强管理和重点防范重大环境污染事故的发生, 大连市环保局依据国家环保总局的有关文件精神, 结合工厂的实际调查资料, 对大连市几家重点工厂的重大环境污染事故隐患风险(以下简称事故风险)大小进行了评价和排序, 为此提出了具有多指标多层次结构的事故风险评价排序的基本模式, 并选用评分指数法结合加权平均法计算各工厂的事故风险指数, 据此得到评价和排序结果^[1]。但指数法和简单加和平均方法自身固有的缺陷会导致计算结果均值化甚至失真, 常常不易作出明确合理的判断。由于评价排序具有相对性, 且危害度、危险度、安全度以及风险都属于模糊概念, 其变化过程具有模糊性质, 所以应用模糊集理论进行事故风险评价是比较适宜的。本文运用模糊集理论中的权距离和隶属度概念, 提出能够有效解决此类多指标多层次优选排序问题的模糊排序理论及方法, 并应用于对大连市4

家重点工厂的事故风险进行评价和排序。

2 事故风险评价的多指标多层次结构

根据评价模式选择危害度、危险度和安全度作为事故风险的3项评判指标。危害度表示工厂过去发生过的污染事故的危害程度, 由发生事故的严重程度和频率等子指标来衡量; 危险度是指工厂所使用或生产的主要有毒物质(污染因子)所固有的污染危险程度, 由有毒物质的毒性、贮存使用量以及人群受影响的比率等子指标决定; 安全度表示工厂设备的安全性、管理措施的可靠性以及周围环境的敏感性, 分别由对设备装置保养运行、安全管理制度执行和厂内外环境敏感程度的检查得分情况构成安全度的子指标。因此事故风险评价是一个具有多指标2层次结构的评判体系, 如图1所示。

3 事故风险的模糊排序方法

设现有 n 个待进行事故风险评价排序的工厂组成论域

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}。 \quad (1)$$

[收稿日期] 2000-10-18; 修回日期 2001-04-28

[基金项目] 国家留学回国人员科研资助项目(99136); 辽宁省教委基金资助项目(9945211806)

[作者简介] 熊德琪(1967-), 男, 辽宁大连市人, 大连海事大学副教授, 博士

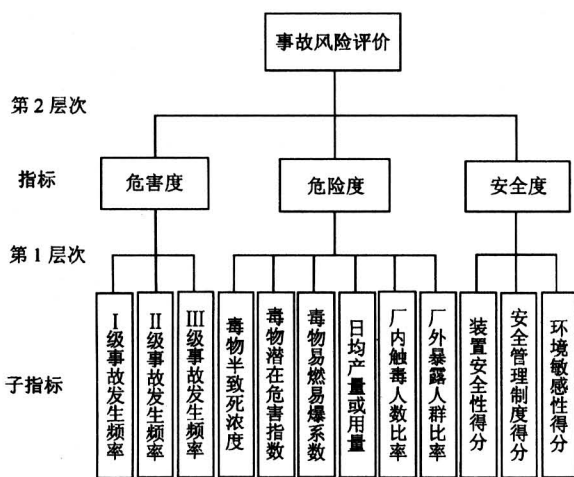


图 1 事故风险评价的多指标多层次结构

Fig.1 Multi-stage and criteria of risk assessment of potential pollution accidents

由于评价和排序是在论域中进行，即只在论域 Y 中的 n 家工厂之间做污染事故风险程度比较，与论域外的其它工厂无关，因此评价和排序具有相对性。另一方面“风险大”是个模糊概念，根据这两种性质，可以避免确定单个工厂对“风险大”的绝对隶属度，而应通过确定各工厂对于“风险大”的相对隶属度来进行排序。则模糊排序的根本目的在于确定各工厂对于模糊子集“风险大”（以 A 表示）的相对隶属度 $u_A(y_j)$ ，即确定映射：

$$u_A: Y \rightarrow [0, 1], y_j \mapsto u_A(y_j). \quad (2)$$

然后根据隶属度的大小得到各工厂的事故风险次序。

由图 1 可知，事故风险评价包含 2 个层次，设第 2 层次评价有 l 项指标，而其中第 k 项指标又对应着第 1 层次的 m 项子指标。排序过程从第 1 层次开始，对于第 k 项指标已知 n 家工厂的 m 项子指标的特征值构成了第 1 层次子指标特征值矩阵：

$${}^k X = \begin{bmatrix} kx_{11} & kx_{12} & \cdots & kx_{1n} \\ kx_{21} & kx_{22} & \cdots & kx_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ kx_{m1} & kx_{m2} & \cdots & kx_{mn} \end{bmatrix} = ({}^k x_{ij}). \quad (3)$$

其中 $k=1, 2, \dots, l; i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ 。

由于子指标特征值的量纲不同，首先应将矩阵 ${}^k X$ 中各元素规格化。对其特征值越大导致风险越大的子指标可用规格化公式

$${}^k r_{ij} = kx_{ij} / (kx_{imax} + kx_{imin}) \quad (4)$$

将其转换。而特征值越大导致风险越小的子指标则用下式进行规格化，

$${}^k r_{ij} = 1 - kx_{ij} / (kx_{imax} + kx_{imin}). \quad (5)$$

式中 kx_{imax}, kx_{imin} 分别表示所有 n 家工厂中第 k 项指标对应的第 i 项子指标的最大值、最小值。由此子指标特征值矩阵式 (3) 可转换为子指标矩阵

$${}^k R = \begin{bmatrix} {}^k r_{11} & {}^k r_{12} & \cdots & {}^k r_{1n} \\ {}^k r_{21} & {}^k r_{22} & \cdots & {}^k r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ {}^k r_{m1} & {}^k r_{m2} & \cdots & {}^k r_{mn} \end{bmatrix} = ({}^k r_{ij}). \quad (6)$$

由于评价排序是相对的，应建立一个虚拟的风险最大工厂作为评价比较的相对标准。在矩阵式 (6) 的基础上，建立一虚拟的风险最大工厂，即此工厂的 m 项子指标值应由所有待评价的 n 家工厂中相应子指标的最大值组成。则虚拟风险最大工厂的子指标值向量为

$${}^k g = ({}^k r_{11} \vee {}^k r_{12} \vee \cdots \vee {}^k r_{1n}, {}^k r_{21} \vee {}^k r_{22} \vee \cdots \vee {}^k r_{2n}, \dots, {}^k r_{m1} \vee {}^k r_{m2} \vee \cdots \vee {}^k r_{mn}) = ({}^k g_1, {}^k g_2, \dots, {}^k g_m). \quad (7)$$

类似地，虚拟的风险最小工厂的子指标值应由所有待评价工厂的相应子指标的最小值组成，即

$${}^k b = ({}^k r_{11} \wedge {}^k r_{12} \wedge \cdots \wedge {}^k r_{1n}, {}^k r_{21} \wedge {}^k r_{22} \wedge \cdots \wedge {}^k r_{2n}, \dots, {}^k r_{m1} \wedge {}^k r_{m2} \wedge \cdots \wedge {}^k r_{mn}) = ({}^k b_1, {}^k b_2, \dots, {}^k b_m). \quad (8)$$

式中 \vee, \wedge 分别为取大、取小运算符。

另外，各子指标对风险指标的影响程度不同，即评价时应考虑各子指标具有不同的重要性权重。设 m 项子指标的权向量为

$${}^k w = ({}^k w_1, {}^k w_2, \dots, {}^k w_m), \quad (9)$$

则对于第 k 项风险指标，第 j 家工厂 ${}^k r_j$ 与虚拟风险最大工厂 ${}^k g$ 之间的差异可用广义 Hamming 距离

$${}^k D_g = \| {}^k w ({}^k g - {}^k r_j) \| = \sum_{i=1}^m {}^k w_i ({}^k g_i - {}^k r_{ij}) \quad (10)$$

来描述^[2]，简称距大距离。相似地，第 j 家工厂与虚拟风险最小工厂的差异可用广义 Hamming 距离

$${}^k D_b = \| {}^k w ({}^k r_j - {}^k b) \| = \sum_{i=1}^m {}^k w_i ({}^k r_{ij} - {}^k b_i) \quad (11)$$

来表示, 简称距小距离。

根据评价的模糊性, 第 j 家工厂 y_j 以隶属度 ${}_k u_{Aj}(y_j)$ (以下简写为 ${}_k u_j$) 隶属于模糊子集“风险大”, 同时又以 ${}_k u_j^c$ 隶属于模糊子集“风险小”, 根据模糊集合论中的余集定义^[3], 应有

$${}_k u_j^c = 1 - {}_k u_j \quad (12)$$

为求解 ${}_k u_j$, 现将 ${}_k u_j$ 和 ${}_k u_j^c$ 视为权重, 分别对距大距离 ${}_k D_g$ 和距小距离 ${}_k D_b$ 加权, 并将经典的最小二乘法最优准则加以拓展, 使目标函数为所有待评价工厂的加权距大距离的二次方与加权距小距离的二次方之和最小^[4], 即

$$\min\{F({}_k u_j) = \sum_{j=1}^n ([{}_k u_j \sum_{i=1}^m {}_k w_i ({}_k g_i - {}_k r_{ij})]^2 + [(1 - {}_k u_j) \sum_{i=1}^m {}_k w_i ({}_k r_{ij} - {}_k b_i)]^2)\} \quad (13)$$

为求解此目标函数及其唯一变量 ${}_k u_j$, 对目标函数式 (13) 求导且令导数为零, 即

$$dF({}_k u_j)/d({}_k u_j) = 0, \quad (14)$$

再经推导整理后可得

$${}_k u_j = \left[1 + \frac{[\sum_{i=1}^m {}_k w_i ({}_k g_i - {}_k r_{ij})]^2}{[\sum_{i=1}^m {}_k w_i ({}_k r_{ij} - {}_k b_i)]^2} \right]^{-1} \quad (15)$$

式 (15) 即为模糊排序的基本理论模型。只要已知子指标矩阵 ${}_k R$ 及其权重向量 ${}_k w$ 后, 通过此模型便可求得 n 家工厂对于第 ${}_k R$ 项指标隶属于风险大的隶属度

$${}_k u = ({}_k u_1, {}_k u_2, \dots, {}_k u_n) \quad (16)$$

由于事故风险评价的第 1 层次共有 l 项指标, 用同样方法最终可以得到第 1 层次评价结果, 构成指标隶属度矩阵

$$U = \begin{bmatrix} 1u_1 & 1u_2 & \dots & 1u_n \\ 2u_1 & 2u_2 & \dots & 2u_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ lu_1 & lu_2 & \dots & lu_n \end{bmatrix} = ({}_k u_j) \quad (17)$$

随后进入第 2 层次评价, 如果令 ${}_k u_j = r_{kj}$, 显然此时矩阵 U 相当于第 1 层次的指标矩阵 ${}_k R$, 即低一层次的计算结果隶属度矩阵 U 构成了高一层次即第 2 层次评价排序的指标矩阵 R 。

设第 2 层次评价排序的 l 项指标的重要性权向量为

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_l), \quad (18)$$

已知第 2 层次的指标隶属度矩阵 R 和重要性权向量 w , 则根据模糊排序基本理论模型式 (15), 最终得到第 2 层次排序结果即各家工厂隶属于事故风险大的隶属度值

$$u = (u_1, u_2, \dots, u_n) \quad (19)$$

依据 u 和隶属度最大原则就可以得到各个工厂环境污染事故风险大小顺序的最终评价结果。类似地, 依据隶属度矩阵 U 可以对各工厂进行第 1 级评价排序即分别对危害度、危险度和不安全度进行分析和评价。

4 应用实例

应用模糊排序理论对大连染料厂 (厂 1)、大连氯酸钾厂 (厂 2)、大连煤气厂 (厂 3) 和大连液化气厂 (厂 4) 4 家重点工厂的事故风险大小进行评价和排序。

根据各工厂的生产工艺及产品类型进行审议后, 确定厂 1 和厂 2 导致风险的主要污染因子是氯气, 厂 3 和厂 4 的主要污染因子分别是粗苯和液化气。各层次的评判指标、指标权重以及样本指标值等数据归纳如表 1 所示。为比较起见, 其中指标权重采用与评分指数法相同的取值。

首先进行第 1 层次的评价与排序比较。以 $k = 2$ 即危险度为例, 由表 1 可知 4 家工厂的危险度对应的 6 项子指标特征值组成矩阵

$${}_2 X = \begin{bmatrix} 370 & 370 & 5 & 100 & 42 & 000 \\ 8 & 8 & 13 & 4 & & \\ 16 & 16 & 15 & 18 & & \\ 62 & 20 & 43 & 1 & 760 & \\ 2.0 & 9.4 & 2.1 & 20.3 & & \\ 50 & 30 & 450 & 380 & & \end{bmatrix} \quad (20)$$

由于子指标半致死浓度 LC_{50} 的值越大表明危险性越小, 与其它指标的性质相反。故 LC_{50} 用规格化公式 (5), 其他子指标用规格化公式 (4), 将矩阵 ${}_2 X$ 转换为子指标矩阵

$${}_2 R = \begin{bmatrix} 0.999 & 0.999 & 0.998 & 0.001 \\ 0.471 & 0.471 & 0.765 & 0.235 \\ 0.485 & 0.485 & 0.455 & 0.545 \\ 0.035 & 0.011 & 0.024 & 0.989 \\ 0.091 & 0.422 & 0.094 & 0.910 \\ 0.104 & 0.062 & 0.938 & 0.792 \end{bmatrix} \quad (21)$$

危险度对应的 6 项子指标的权向量为

$${}_2 w = (0.20, 0.20, 0.20, 0.20, 0.10, 0.10) \quad (22)$$

表 1 4 家工厂事故风险评价的指标和权重值

Table 1 Attributes and weights of criteria for the risk assessment of potential accidents

第 2 层次		第 1 层次		子 指 标 特 征 值			
指标	权重	子 指 标	权重 ^{*1}	厂 1	厂 2	厂 3	厂 4
危害度	0.3	I 级事故发生频率/a ⁻¹	0.17	1.5	0.48	0	0.4
		II 级事故发生频率/a ⁻¹	0.33	0.1	0.68	0	0
		III 级事故发生频率/a ⁻¹	0.50	0	0.20	0	0
危险度	0.3	毒物半致死浓度 LC ₅₀ /g·m ⁻³	0.20	370	370	5 100	42 000
		毒物潜在危害指数	0.20	8	8	13	4
		毒物易燃易爆系数	0.20	16	16	15	18
		毒物日均产量或用量/t·d ⁻¹	0.20	62	20	43	1 760
		厂内接触毒物人数比率/% ^{*2}	0.10	2.0	9.4	2.1	20.3
		厂外人群暴露比率/10 ⁻⁴ ^{*3}	0.10	50	30	450	380
安全度	0.4	装置安全性得分	0.55	44.5	46.5	52.0	54.0
		安全管理制度得分	0.20	20.0	19.0	20.0	20.0
		环境敏感性得分	0.25	21.0	21.0	24.0	25.0

*1 单位为 1;

*2 厂内接触毒物人群比率 = (接触毒物人数 / 全厂职工总人数) × 100 (%);

*3 厂内暴露人群比率 = (距厂界 1 km 半径范围内人口数 / 全市人口数) × 10⁴

将子指标矩阵₂R 和子指标权向量₂w 代入模糊排序理论模型式 (15) 中, 得到输出结果, 即 4 家工厂对于危险度大的隶属度向量

$${}_2u = (0.273, 0.335, 0.641, 0.570).$$

隶属度值越大表示工厂的危险度相对越大。由隶属度向量₂u 可知, 就危险度而言, 排序顺序应为厂 3 > 厂 4 > 厂 2 > 厂 1。

类似地, 可得到各工厂对于危害度大的隶属度向量

$${}_1u = (0.070, 0.984, 0.001, 0.002),$$

即按危害度排序, 厂 2 > 厂 1 > 厂 4 > 厂 3。

4 家工厂对于安全度小的隶属度向量

$${}_3u = (0.995, 0.974, 0.064, 0.001),$$

即在安全度方面, 厂 1 < 厂 2 < 厂 3 < 厂 4。

综合第 1 层次的隶属度向量, 构成第 2 层次 4 家工厂的 3 项指标对于“风险大”的指标矩阵。

$$U = \begin{bmatrix} 0.070 & 0.984 & 0.001 & 0.002 \\ 0.273 & 0.335 & 0.641 & 0.570 \\ 0.995 & 0.974 & 0.064 & 0.001 \end{bmatrix}.$$

在第 2 层次将矩阵 U 视作指标矩阵 R, 且由表 1 按重要性给出的危害度、危险度和安全度 3 项事故风险评判指标的权向量

$$w = (0.3, 0.3, 0.4).$$

然后, 再次应用模糊排序理论模型式 (15), 最终计算得到第 2 层次的评价结果, 即 4 家工厂对事故风险的隶属度向量

$$u = (0.543, 0.980, 0.040, 0.016),$$

则可根据各自隶属度的大小排出 4 家工厂的事故风险大小顺序。可以看出, 厂 2 的环境污染事故风险最大, 主要因为厂 2 的危害度较大, 即过去发生污染事故最频繁, 且安全系统也不完善, 虽然使用的氯气量少使其危险度较小, 但总体来讲最有可能发生重大污染事故, 应该加以重点防范。厂 1 的事故风险虽不及厂 2, 但由于其设备装置的安全度最低, 也存在较大事故风险, 不容忽视。相对而言厂 3 和厂 4 风险较小, 厂 3 要略大于厂 4。评分指数法得到的厂 1、厂 2、厂 3 和厂 4 的风险指数分别为 61.32, 69.44, 41.4, 45.1, 数值比较平均。评价排序结果与应用本文方法基本相同, 只是厂 4 的风险略大于厂 3。但从第 1 层次评价结果来看, 在危害度和不安全度方面, 厂 4 都比厂 3 小, 因此评判厂 4 的风险略小于厂 3 较为合理。

5 结语

本文提出的有效解决具有多指标多层次结构的

工厂重大环境事故风险评价与排序问题的模糊排序理论及方法,能够克服常规的评分指数法与加权平均法所得到的评价结果易均化、失真等缺陷,计算过程经过优化,离散性好,评价排序结果合理、可靠,可以帮助全面了解各工厂发生重大污染事故的风险大小次序,使有关部门做到心中有数,有针对性地加强重点管理,采取相应防范措施防止事故的发生。

参考文献

- [1] 大连市环保局. 大连市重点工厂重大环境污染事故隐患风险评价报告书 [R]. 大连:大连市环保局, 1996
- [2] 熊德琪, 陈守煜. 城市大气污染物浓度预测模糊识别模式 [J]. 环境科学学报, 1993, (4):482~490
- [3] 楼世博, 孙章, 陈化成. 模糊数学 [M], 北京: 科学出版社, 1983
- [4] 陈守煜. 系统模糊决策理论与应用 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1994

Fuzzy Rank Methodology for Risk Assessment of Environmental Pollution Accidents

Xiong Deqi, Chen Gang, Li Qiong

(Department of Environmental Science & Engineering, Dalian Maritime University,
Dalian, Liaoning 116026, China)

[Abstract] Based on the fact that risk assessment of environmental pollution accidents among factories is a multi-criteria and multi-stage process, and is of relativity and fuzziness, the fuzzy rank theory is developed and applied to solve such ranking problems by means of the fuzzy weighted distance, membership degree and the extensive Minimum Square Criterion. Furthermore, the methodology is applied to assess the risk of potential pollution accidents among four important chemical factories in Dalian, and the results are more reasonable than those obtained by the Index Method.

[Key words] pollution accidents; risk; fuzzy; assessment; rank

《中国工程科学》2001年第3卷第9期要目预告

关于我国卫星工程技术途径的思考	陈珍源等
..... 叶培建	并联水泵变压变流量运行优化调度
钱学森论产业革命 黄顺基 李洪斌等
钱学森的科学观 冯国瑞	硝酸铵膨化理论研究 吕春绪
降低树脂基碳纤维复合材料成本的	生物法净化低浓度挥发性有机
工程途径 赵渠森	废气研究 杨显万等
聚丙烯技术进展 袁晴棠	应用先进技术改造传统炼铜产业 ... 孔繁义
有毒有害化学品环境污染及安全	中国钢铁工业和清洁生产 刘超等
防治建议 魏复盛	造纸提取黑液污染零排放新工艺
机泵群实时监测网络和故障诊断	研究 黄立新等
专家系统 高金吉	国外光纤带和带状光缆技术
基于知识的多变量非线性系统变	的最新发展 刘良炎
结构解耦控制 涂承缓等	中国铜冶金的主要发展方向 周松林
基于滑模控制的可拓控制器设计	虚拟企业是企业发展的新形式 ... 李昕等