

A Risk Assessment Model Based on Critical Index Point-Set Mapping and Information Diffusion

Ren Zhang, Zhisheng Xu, Zhisong Huang, Mei Hong

Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing

Email: zren63@126.com

Received: Mar. 15th, 2011; revised: Apr. 1st, 2011; accepted: Apr. 2nd, 2011.

Abstract: A kind of idea and technique of knowledge extraction and risk evaluation was presented based on critical term, the basic operation step and modeling route were expounded. Based on an example of aviation weather supporting, a risk evaluation model of weather influencing plane taking off and landing safety was established, and the corresponding evaluation experiment were carried out.

Keywords: Critical Index; Point-Set Mapping; Information Diffusion; Risk Assessment

基于临界条件点-集映射与信息扩散的风险评估模型

张 韧, 徐志升, 黄志松, 洪 梅

中国人民解放军理工大学气象学院, 南京

Email: zren63@126.com

收稿日期: 2011年3月15日; 修回日期: 2011年4月1日; 录用日期: 2011年4月2日

摘 要: 基于信息扩散思想和模糊集合理论, 提出了一种基于临界条件的知识获取和评估建模的研究思想和算法技术, 阐述了基本的方法步骤和模型推导, 并以航空气象的保障评估为例, 构建了气象条件影响飞机起降安全的风险评估模型。

关键词: 临界条件; 点-集映射; 信息扩散; 风险评估

1. 引言

近年来, 世界范围内的地震、火山、泥石流、洪涝、干旱等自然灾害频发, 给社会经济生活和人类生命安全带来严重影响和威胁。防灾减灾与应急响应已成为各国政府工作重点和当今社会关注的热点, 其前提条件则是对自然灾害致灾因子和风险损失客观地刻画和准确地评估。

鉴于自然灾害的发生机理复杂、影响因子众多、案例样本获取困难, 目前自然灾害风险评估的主要方法和技术手段多为统计分析和半经验、半理论范畴^[1-3]。为了克服地震等强破坏性、小概率事件灾害评估中面临的样本信息稀缺困难, 黄崇福^[4]提出了基于信息矩阵和信息扩散思想的小样本数据信息扩散方法及

基金项目: 国家自然科学基金项目(41075045)与气象灾害教育部重点实验室开放课题资助。

其算法模型, 并应用于震中烈度识别和震害面积估计等实践之中, 促进了地震灾害评估技术的改进和完善^[5]。

然而, 在许多的自然灾害评估和日常风险决策中, 灾害样本和事件案例往往也难以获取, 评估决策所能依据的多为基本的临界条件或决策原则, 如何基于这些更具有实际意义的临界条件信息, 进行客观的知识提取和建立定量的风险评估模型, 具有应用价值和推广前景。本文基于临界条件知识和信息扩散思想, 探讨了相应的研究方法和途径。

2. 保障规范与临界条件

“保障规范”的定义和内涵, 根据《中国大百科全书》中定义: 为完成某项任务而采取的组织实施专

Table1. The example simulating plane taking off/landing aviation weather criterion of certain airport

表 1. 某机场飞机起降的航空气象临界条件模拟示例

1. 云底高(m)/能见度(km)条件				
机型	A 型飞机	B 型飞机	C 型飞机	...
临界条件				
昼间	≥ 100/1.5	≥ 150/2.0	≥ 140/2.0	
夜间	≥ 150/1.5	≥ 200/2.0	≥ 190/2.0	

2. 风向/风速(m/s)条件			
风向	逆 风	侧 风	顺 风
临界条件			
风 速	≤ 18	≤ 14	≤ 12

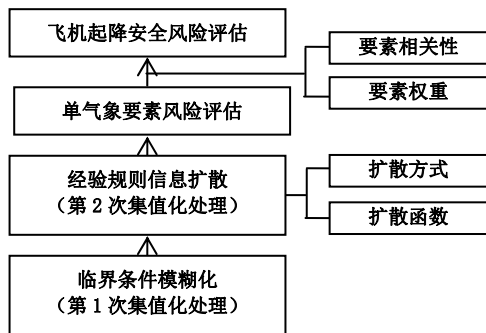


Figure 1. Flow chart of risk assessment based on criterion
图 1. 基于临界条件的风险评估流程框架

业勤务、提供保障信息和提出趋利避害建议的综合措施^[6]。因此，针对某专项活动的保障规范涵盖了为保障该项任务顺利实施所提供的危险预警和风险评估的临界底线和基本要求。

以航空飞行气象保障为例，气象要素对飞行安全的保障和决策规范主要表现为飞行活动的环境适应条件和临界指标等形式，它们主要表现为宽泛的临界条件和模糊性经验知识。表 1 给出了某机场不同类型飞机起飞、着陆的气象保障条件规范示例，这实际上是飞行应满足的最低的气象条件(保障评估中，临界条件形式包括：大于型 $A > a$ ；小于型 $b < B$ 和区间型 $a \sim b$ 实际的气象影响因素可根据具体情况添加)。

因此，根据上述临界条件，只有当实际天气满足最低气象条件时，才能安全起降；当天气条件低于该临界条件时，则应禁止飞行。最低气象条件的确定，一般是依据机场地形条件、机种(型)性能、昼或夜间影响状况以及飞行员驾驶技术和飞行任务等多种因素

综合确定的。因此，实际气象临界条件还可进一步划分得更加具体细致，包括与机场的净空环境、导航设施、飞机机型和飞行员技术等级相关的气象临界条件。上述临界条件为航空气象保障和飞行安全风险评估提供了评判标准和决策依据，但在实际保障中，气象条件大多较为零散、同时满足各个临界条件情况并不多。而目前气象保障还主要依靠保障人员参照经验知识和保障规范主观决策。这样的保障和评估手段，一则缺乏客观量化表述，二来不同程度地夹杂个人主观倾向，对于飞行繁忙、机型混杂、设备多样的大型机场的复杂气象保障，情况将更加复杂，常规保障方法和评估手段已难以满足保障要求。

与此类似，其它领域的一些风险评估和保障决策亦存在同样的问题(如危险品存储风险评估、安全生产风险评估和环境污染风险评估等)，均缺少风险事件和危险事故的实际案例和样本(本身属小概率但危害性巨大的事件)，赖以评估决策的信息知识来源于从相应行业的理论和实践中归纳、提炼出来的保障规范。

针对上述问题，我们拟基于信息扩散和模糊集思想，从临界条件中拓展、提取客观的保障决策知识和建立定量的风险评估模型。

3. 基于临界条件的风险评估

3.1. 基本思想

基于临界条件的风险评估，是针对信息不足，且信息极度欠缺(只知道一个点的信息)情况下的知识拓展与评估建模。为此，我们借鉴信息扩散思想，对单值临界条件进行两次模糊集值化处理，提取和利用临界条件值域所蕴含的信息。

由于临界条件中最低气象条件是分别针对单个要素给出的，为此我们相应地在风险评估模型中建立起一个层次结构，首先进行单个气象要素影响飞机起降安全的风评估，然后再对各气象要素的影响评估进行融合，进而得到多气象要素影响飞机起降安全的综合风险评估。上述风险评估流程如图 1 所示。

3.2. 单一气象要素的风险评估

首先从单一气象要素入手，以“能见度”对 A 型飞机起、降影响为例(暂不考虑其它因素)来进行分析。假设 A 型飞机起飞的最低气象条件为：能见度 ≥ 1.5 km，

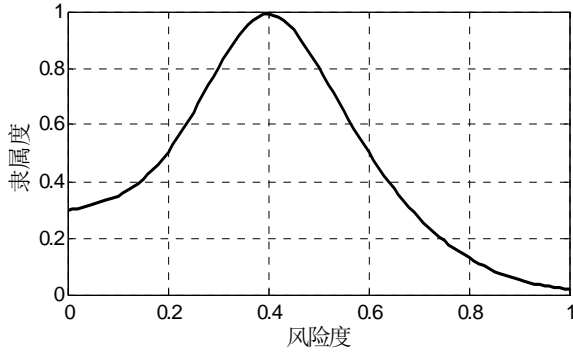


Figure 2. Fuzzy expression for critical qualification
图 2. 临界条件的模糊化表达

保障中可以理解为当能见度为 1.5 km 及以上时, 飞机可安全起、降; 但能见度低于该值时飞机就存在一定程度的安全风险。对上述临界条件语言, 可对其进行模糊化处理并转换成定量数学语言^[7]。用模糊集 \tilde{A} 表示“在最低气象条件下飞机的安全状况”, 则有:

$$\tilde{A} = \int \mu / v。$$

其中 $v \in [0,1]$ 为风险度 (0 表示无风险, 1 则表示最高风险); μ 为模糊集 \tilde{A} 的隶属度函数, 记为

$$\mu = \mu_{Exp}(v) \tag{1}$$

图 2 给出了一个模糊化的示例结果, 它表示危险度在 0~1 之间均存在可能性, 但危险度为 0.4 的可能性 (隶属度) 最大, 即在此最低气象条件下飞机起降的危险性 (风险性) 较小。当然, 不同决策者对该模糊概念的理解可能略有偏差, 用来表示该模糊概念的模糊集也有所不同, 但总体趋势应相差不大。对模糊概念的合理描述与量化表达是一个困难的问题, 该模糊化结果还可进一步优化。

当气象条件达到最好时, 飞机的起、降安全可以不考虑气象因素的影响 (对飞机起飞、降落有显著影响的主要是气象条件), 即飞机是最安全的, 此时危险度 (风险度) 最低; 类似地, 当气象条件达到最为恶劣程度时, 飞机的危险度 (风险度) 也最高。上述临界条件, 也可视为评价的准则, 同样对此作模糊化处理, 其模糊化表达结果如图 3 所示。

相应的隶属度函数分别记为:

$$\mu = Y_{good}(v) \tag{2}$$

$$\mu = Y_{bad}(v) \tag{3}$$

其中 $v \in [0,1]$ 表示风险度。图中实线为气象条件最好时的风险曲线, 虚线为气象条件最差时的风险曲线。这

里同样存在决策者偏好的差异, 为讨论问题方便, 我们只给出了一个模糊化结果的示例。

经模糊化处理, 临界条件的单值样本集值可化成线性的多值样本

$$\{(v_i, \mu_i) | v_i \in [0,1], \mu_i \in [0,1]\}$$

上式表明, 当实际能见度条件等于最低气象条件时, 飞机的风险度为模糊集合 $\tilde{A} = \sum \mu_{Exp} / v, v \in [0,1]$ 。此时的能见度仍然是一个单值 (为最低的气象条件 2.0 km), 因此需进行第二次集值化处理, 使该曲线上的多值样本拓展到一个输入-输出平面上。我们称这种第二次集值化处理为“经验规则扩散”过程。

(1) 经验规则扩散方式

以模糊化处理后的临界条件知识(1)式为信息源进行扩散, 同时保证扩散结果要与两条评价准则(2)式和(3)式一致, 即图 2 中风险度曲线经信息扩散到“最好”和“最坏”能见度条件时的风险度曲线应分别与图 3 中的实线和虚线趋于一致。

(2) 扩散函数

扩散过程中, 信息源每扩散一个单位距离就会损失一定的信息量, 因此扩散函数可用扩散系数的距离乘幂来表述, 即:

$$\mu_d = M \cdot \mu_{Exp} \cdot k^d \tag{4}$$

其中 k 为扩散系数, d 为扩散距离, M 为归一化系数, μ_{Exp} 为在信息源处的信息量。 μ_d 表示通过经验规则扩散后, 距信息源的扩散距离 d 处所获得的信息量。

(3) 扩散系数

考虑扩散过程是非均匀的, 对于不同扩散方向、不同风险度, 其对应的扩散系数也应各不相同。根据“气象条件变好时, 风险度趋于降低”的常识, 因此向“最好气象条件”方向扩散时, 风险度趋小的可能性应该增大, 对应到扩散函数中就表现为风险度小的地方扩散系数大, 风险度大的地方扩散系数小。

因此, 对于向最好条件方向的扩散, 扩散系数可定义为:

$$k = k_{good}(v) \tag{5}$$

它是风险度的递减函数, 并定义 $v = 0$ 时的扩散系数为 1; 对于向“最坏条件”方向的扩散, 扩散系数定义为:

$$k = k_{bad}(v) \tag{6}$$

它是风险度的递增函数, 并规定 $v = 1$ 时的扩散系数为 1。

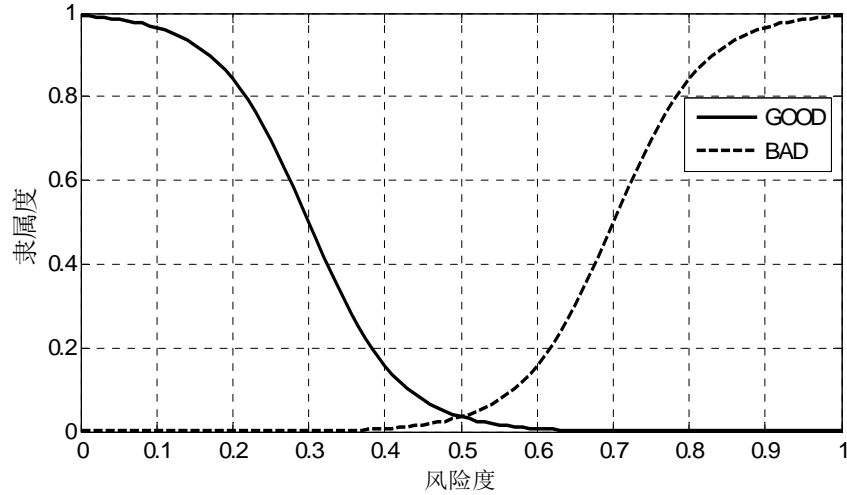


Figure 3. The risk curve under best (solid line) and worst (dashed line) condition
图 3. “最好(实线)”和“最坏(虚线)”条件下的风险曲线

Table 2. The fuzzication results of experimental rules
表 2. 经验规则的模糊化结果

风险度[v]	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
隶属度[μ _{Exp} (v)]	0.3	0.35	0.5	0.8	1	0.8	0.5	0.27	0.13	0.05	0.02

(4) 扩散距离

假设 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_s\}$ 为气象要素的控制点集合空间。所谓控制点是指定义在其论域空间上的标准化离散点。控制点的设置应遵循以下原则：

- 1) 能够分布到要素的整个论域空间；
- 2) 考虑气象要素变化对飞机起降影响的敏感性，

影响和变化剧烈的区域可适度设置密集些；反之可相对稀疏些。

由于几何距离不能蕴涵“气象要素对飞机起降影响的敏感性”信息，故此我们将扩散距离 d 的定义拓展为信息源到扩散点之间的控制点距离，则信息源 x_{Exp} 与扩散点 x 之间的扩散距离为：

$$d = \left| \left(j + \frac{x - u_j}{u_{j+1} - u_j} \right) - \left(i + \frac{x_{Exp} - u_i}{u_{i+1} - u_i} \right) \right| \quad (7)$$

其中 $u_j \leq x < u_{j+1}$ ， $u_i \leq x_{Exp} < u_{i+1}$ 。

(5) 扩散公式的推导

设最低气象条件与最好气象条件之间的扩散距离为 D_{good} ，则根据“气象条件最好”时风险度的隶属度函数为(2)式这一准则，可得到一个扩散系数的方程：

$$M \cdot \mu_{Exp} \cdot k_{good}^{D_{good}} = Y_{good} \quad (8)$$

当 $v=0$ 时，扩散系数为 1，故有：

$$M \cdot \mu_{Exp}(0) = Y_{good}(0) \quad (9)$$

联立(4)、(8)、(9)式，可得向最好方向的扩散函数为：

$$\mu_{good} = \frac{Y_{good}(0)}{\mu_{Exp}(0)} \cdot \mu_{Exp} \cdot \left(\frac{Y_{good}}{(Y_{good}(0)/\mu_{Exp}(0)) \cdot \mu_{Exp}} \right)^{\frac{d}{D_{good}}} \quad (10)$$

对于向最坏条件方向的扩散，与上述情况类似，有：

$$M \cdot \mu_{Exp} \cdot k_{bad}^{D_{bad}} = Y_{bad} \quad (11)$$

$$M \cdot \mu_{Exp}(1) = Y_{bad}(1) \quad (12)$$

将它们与(4)式联立，可得到向最坏方向的扩散函数为：

$$\mu_{bad} = \frac{Y_{bad}(1)}{\mu_{Exp}(1)} \cdot \mu_{Exp} \cdot \left(\frac{Y_{bad}}{(Y_{bad}(1)/\mu_{Exp}(1)) \cdot \mu_{Exp}} \right)^{\frac{d}{D_{bad}}} \quad (13)$$

从上述推导过程可归纳得到如下扩散函数：

$$\mu_{diff} = \begin{cases} \frac{Y_{good}(0)}{\mu_{Exp}(0)} \cdot \mu_{Exp} \cdot \left(\frac{Y_{good}}{(Y_{good}(0)/\mu_{Exp}(0)) \cdot \mu_{Exp}} \right)^{\frac{d}{D_{good}}}, & \text{"good"条件方向} \\ \frac{Y_{bad}(1)}{\mu_{Exp}(1)} \cdot \mu_{Exp} \cdot \left(\frac{Y_{bad}}{(Y_{bad}(1)/\mu_{Exp}(1)) \cdot \mu_{Exp}} \right)^{\frac{d}{D_{bad}}}, & \text{"bad"条件方向} \end{cases} \quad (14)$$

3.3. 多要素的综合风险评估

考虑多个气象要素对飞机起降安全的影响，只要一个要素的评价结果差、风险度大，则多要素影响评估的风险度也应较大，即进行多要素影响风险评估时应考虑“水桶效应”。但也不能简单地取各要素评估的最大风险值，因为不同要素间存在重要性（权重）的差别，此外各要素的影响作用还存在叠加和重合等问题，也需要考虑。

基于上述分析，我们提出如下的多要素融合集成原则：

- (1) 综合风险度取值范围在[0,1]，且其值是唯一的
- (2) 综合风险度不小于各单要素影响下的风险度
- (3) 综合风险度不大于各单要素影响的风险度之和

基于上述风险度集成原则，定义如下的要素集成法则：

步骤 1：加入权重。假设 $r_i \in [0,1]$ 为单要素 i ($i = 1, 2, \dots, n$) 风险评价结果，考虑该要素所属的权重之后，其对综合风险度的贡献为 $R_i = w_i r_i$ ， $w_i \in [0,1]$ 。

步骤 2：进行排序。将 $\{R_i\}$ 按照从大到小的顺序进行排序，得到 $\{R'_i\}$ 。

步骤 3：综合集成。按照合成公式

$$R'_{i+1} = R'_i + (1 - R'_i)^2 \cdot R'_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (15)$$

依次两两合成，最后得到综合风险度 $R = R'_n$ 。

若单要素风险评估结果为模糊数时，则涉及模糊风险度的融合集成。考虑到多要素模糊风险度直接集成难度较大，因此可先进行去模糊化处理^[8]，然后再进行集成。

4. 应用试验

4.1. 评估试验对象

根据表 1 给出的某机场 B 型飞机昼间起飞、着陆最低气象条件为：能见度 ≥ 2.0 km；云底高 ≥ 150 m；逆风 ≤ 18 m/s（顺风 ≤ 12 m/s）；侧风 ≤ 14 m/s。

基于临界条件风险评估建模思想和途径，建立该机场、该型飞机起飞、降落的气象要素影响的风险评估模型，进而依据实际气象条件，对飞机起降的安全性进行风险评估。

4.2. 经验规则模糊化

对临界条件下该飞机起飞、着陆安全风险进行模糊化处理，并得到与图 2 逼近的结果。由于该曲线不易用一个简单函数来描述，且不同决策者可能得到不同的模糊化结果，为便于描述和修改，可引入离散型模糊集来给出模糊化结果 $\mu_{Exp}(v)$ ，具体数值如表 2 所示。

图 3 中，“最坏”条件的风险曲线形状与双曲正切函数 $\text{thx} = \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1}$ 曲线比较接近。因此可用变形的双曲正切函数来逼近“最好条件”和“最坏条件”的模糊化隶属度函数，即：

$$Y_{good}(v) = 0.5 - 0.5\text{th}\left[L_{good} \cdot (v - v_{good})\right] \quad (16)$$

$$Y_{bad}(v) = 0.5 + 0.5\text{th}\left[L_{bad} \cdot (v - v_{bad})\right] \quad (17)$$

其中 $v_{good} = 0.2$ ， $L_{good} = \frac{2.5}{\min(v_{good}, 1 - v_{good})}$ ， $v_{bad} = 0.8$ ， $L_{bad} = \frac{2.5}{\min(v_{bad}, 1 - v_{bad})}$ 。其对应的隶属度函数曲线如图 4 所示。

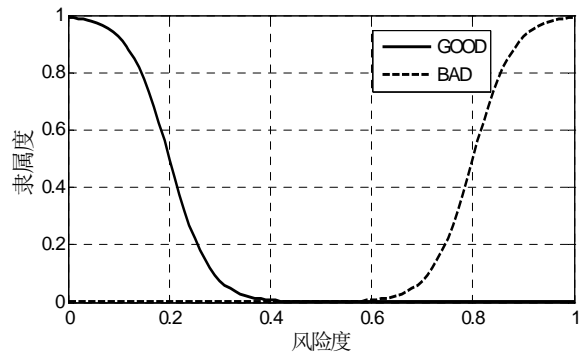


Figure 4. The fuzzy curve under best (solid line) and worst (dashed line) criterion
图 4. “最好（实线）”、“最坏（虚线）”临界条件的模糊化

Table 3. The contrast list between visibility and risk

表 3. 能见度-风险度对照表

能见度(km)	0	0.1~0.3	0.5~0.7	1.0	1.5	2	3	5	10
风险度	1.0	0.9	0.8	0.7	0.5	0.4	0.2	0.1	0

Table 4. The contrast list between cloud bottom and risk

表 4. 云底高-风险度对照表

云底高(m)	0	50	70~100	120	150	180~200	220~250	300~500	≥ 700
风险度	1.0	0.9	0.8	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	0

Table 5. The contrast list between tail wind and risk

表 5. 顺风-风险度对照表

顺风(m/s)	0~5	8	10	12	14	16	18~20	25~35	40
风险度	0	0.1	0.2	0.4	0.5	0.7	0.8	0.9	1

Table 6. The contrast list between against-wind and risk

表 6. 逆风-风险度对照表

逆风(m/s)	0~8	10~12	14	16	18	20	25~30	35	40
风险度	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	0.9	1

Table 7. The contrast list between crosswind and risk

表 7. 侧风-风险度对照表

侧风(m/s)	0~5	8~10	12	14	16	18~25	30~35	40
风险度	0	0.1	0.2	0.4	0.5	0.8	0.9	1

4.3. 控制点设置

考虑到该飞机受能见度(km)、云底高(m)、顺风(m/s)、侧风(m/s)、逆风(m/s)等气象要素的影响程度和重要性差异,根据实际气象保障经验和规范,对其分别设置如下控制点:

$$U_1 = \{0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 1.5, 2, 3, 5, 10\}$$

$$U_2 = \{0, 50, 70, 100, 120, 150, 180, 200, 220, 250, 300, 400, 500, 700, 1000, 1500, 2000\}$$

$$U_3 = \{0, 5, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 25, 30, 35, 40\}$$

$$U_4 = \{0, 5, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 25, 30, 35, 40\}$$

$$U_5 = \{0, 5, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 25, 30, 35, 40\}$$

4.4. 经验规则扩散函数

对能见度和云底高而言,它们属“越大越好”型,

其向信息源右端扩散为“good”条件方向,其左端为“bad”条件方向。即当 $x > x_{Exp}$ 时,扩散函数可用(10)式;当 $x < x_{Exp}$ 时,扩散函数可用(11)式。顺风、逆风和侧风属“越小越好”型,当 $x > x_{Exp}$ 时为“bad”条件方向,扩散函数可用(11)式;当 $x < x_{Exp}$ 时为“good”条件方向,扩散函数可用(10)式。

据上述分析,得云底高和能见度的扩散函数为:

$$\mu_{diff}(x, v) = \begin{cases} 3.33\mu_{Exp}(v) \cdot \left[\frac{0.5 - 0.5\text{th}(12.5v - 2.5)}{3.33\mu_{Exp}(v)} \right]^{D_{good}^d}, & x > x_{Exp} \\ \mu_{Exp}(v), & x = x_{Exp} \\ 50\mu_{Exp}(v) \cdot \left[\frac{0.5 + 0.5\text{th}(12.5v - 10)}{50\mu_{Exp}(v)} \right]^{D_{bad}^d}, & x < x_{Exp} \end{cases} \quad (18)$$

Table 8. The synthetical risk assessment simulation of considering multi-factors influence

表 8. 多气象要素影响综合风险模拟评估结果

要素名称	能见度 (km)	云底高 (m)	顺/逆风 (m/s)	侧风 (m/s)	综合风险 度	
权重	0.8	0.8	1.0/0.8	0.9		
模拟 观测 数据	1	1.5	200	10/0	12	0.5774
	2	1.0	120	16/0	10	0.7846
	3	0.7	100	0/14	20	0.8101
	4	3.0	150	0/20	14	0.6559
	5	2.0	300	0/25	16	0.7334

顺风、逆风、侧风的扩散函数为：

$$\mu_{diff}(x, v) = \begin{cases} 3.33\mu_{Exp}(v) \cdot \left[\frac{0.5 - 0.5th(12.5v - 2.5)}{3.33\mu_{Exp}(v)} \right]^{\frac{d}{D_{good}}}, & x < x_{Exp} \\ \mu_{Exp}(v), & x = x_{Exp} \\ 50\mu_{Exp}(v) \cdot \left[\frac{0.5 + 0.5th(12.5v - 10)}{50\mu_{Exp}(v)} \right]^{\frac{d}{D_{bad}}}, & x > x_{Exp} \end{cases} \quad (19)$$

其中 x 表示气象要素， x_{Exp} 为最低气象要素条件点，扩散距离 d 及 D_{good} ， D_{bad} 可通过(7)式计算得到。

4.5. 风险评估模拟试验

基于所建立的单要素风险评估模型，可得到能见度、云底高、顺风（逆风）、侧风对 B 型飞机起飞、着陆影响的风险评估结果如表 3~7 所示。

基于各要素的风险评估模型，并得到单要素影响风险评估结果后，根据融合集成公式(15)可得到基于临界条件的飞机起飞、着陆的气象要素影响风险评估。表 8 中给出了五组模拟气象观测数据计算得出的风险评估试验结果。

上述单要素的风险评估结果基本上反映了能见度、云底高、顺风、侧风和逆风对飞机起飞、着陆影响的基本情况，评估结果与保障经验相符。多要素集成风险评估结果较合理地顾及了各要素的重要性和影响程度（即权重），得到的综合影响评估结果基本符合客观实际。

5. 小结

针对实际保障和灾害评估中案例/样本稀少问题，阐述了基于信息扩散和模糊集合的知识拓展与风险评估建模的研究思想和方法途径，进行了理论推导，以航空气象保障为例进行了评估建模与仿真试验。该方法从现有的临界条件出发，利用模糊集值化优势，充分挖掘和拓展有限的决策信息，得到客观、量化的风险评估结果，为信息不完备条件（当前防灾减灾和风险评估中普遍存在而短期之内又无法解决的困难）下的自然灾害影响和风险评估作了积极的探索。需说明的是，实际的自然环境影响过程和影响机理非常复杂，各因子间存在着非线性相互影响和制约环节。因此，对该问题的解决存在循序渐进、逐步深入的过程，本文仅作了粗略的尝试，尚需进一步改进和完善。

参考文献 (References)

- [1] 葛全胜, 邹铭, 郑景云. 中国自然灾害风险综合评估初步研究[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] 张继权, 李宁. 主要气象灾害风险评估与管理的数量化方法及应用[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2008.
- [3] 中国海洋灾害风险评价与减灾对策[EB/OL]. http://www.123bx.com/insurance/8/baoxian1596_1.html, 2006-09-20.
- [4] C. F. Huang. Information matrix and application. J. General Systems, 2001, 30(6): 603-622.
- [5] 黄崇福. 自然灾害风险分析理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [6] 中国大百科全书(大气-海洋-水文科学卷光盘版)[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1999.
- [7] 李登峰. 模糊多目标多人决策与对策[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [8] 谢季坚. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.