



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404845

引用格式: 杨昌其, 姜美岑, 林灵. 基于突变理论的模糊推理系统风险评价模型[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(22): 9586-9594.

Yang Changqi, Jiang Meicen, Lin Ling. The risk assessment model based on catastrophe theory and fuzzy inference system[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(22): 9586-9594.

航空、航天

基于突变理论的模糊推理系统风险评价模型

杨昌其, 姜美岑, 林灵

(中国民用航空飞行学院空中交通管理学院, 广汉 618307)

摘要 在 ASIS 系统上采集 2017—2023 年共计 86 917 起不正常事件数据作为研究对象, 并在此基础上构建不正常事件指标体系。为了确保航空运行安全, 构建准确、可靠的风险评价模型来对不正常事件进行深入分析, 从而实现有效的风险管理。首先, 在模糊推理系统中引入突变理论的原理, 能够使其更好地应对复杂问题, 提高评价的准确性。然后, 构建突变理论的模糊推理系统风险评价模型对航空运行不正常事件进行风险评价。其次, 选用 56 个有详细背景信息记录的不正常事件进行实例分析, 并与云模型进行对比分析, 从而验证模型的可行性和精确性。最后, 对相关指标进行模糊控制, 为航空运行安全管理工作提供指导。

关键词 风险评价; 不正常事件; 突变理论; 模糊推理系统; 风险指标

中图分类号 V328; **文献标志码** A

The Risk Assessment Model Based on Catastrophe Theory and Fuzzy Inference System

YANG Chang-qi, JIANG Mei-cen, LIN Ling

(Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

[Abstract] In the ASIST system, data on 86 917 abnormal events from 2017 to 2023 are collected as research objects, and an indicator system for abnormal events was established. To ensure the safety of aviation operations, accurate and reliable risk assessment models were developed to analyze abnormal events in depth, thereby achieving effective risk management. Firstly, the principle of catastrophe theory was introduced into the fuzzy inference system, which enables it to better handle complex issues and enhance the accuracy of evaluations. Then, a risk assessment model based on catastrophe theory and fuzzy inference system was developed to assess the risks of abnormal aviation events. Additionally, 56 cases with detailed background information records were selected for instance analysis, and compared with the cloud model, to verify the feasibility and accuracy of the model. Finally, relevant indicators were controlled using fuzzy methods, providing guidance for the safety management work of aviation operations.

[Keywords] risk assessment; abnormal events; catastrophe theory; fuzzy inference system; risk indicators

安全一直是交通运输行业的永久主题, 为加强航空运行事故的原因调查和预防, 按照《国际民航组织公约》附件 13 中的规定, 各国必须建立强制性事故报告系统并自愿增设事故征候报告系统^[1]。由于不正常事件的复杂性、多变性, 中国在对不正常事件的研究目前仍集中在事件成因与风险因素分析上, 近年来, 越来越多的专家学者开始对模糊

集合、模糊规则及模糊逻辑运算等方面进行深入研究, 使得模糊推理系统已广泛应用于工业控制、智能导航、风险评价等领域。Bagherian^[2]提出了一种模糊逻辑系统可以寻找接近最优的飞行路径的方法。Yang 等^[3]构建了模糊环境下的危险品运输风险识别、评估和控制的管理框架。Wei 等^[4]提出了一种基于模糊证据推理的深基坑建设项目风险评

收稿日期: 2024-06-28; 修订日期: 2025-04-28

基金项目: 四川省科技计划(2023YFSY0025)

第一作者: 杨昌其(1976—), 男, 土家族, 贵州思南人, 硕士, 教授。研究方向: 空中交通管理、空管安全管理、空管信息处理。E-mail: 1132221610@qq.com。

* 通信作者: 姜美岑(2001—), 女, 汉族, 四川南充人, 硕士研究生。研究方向: 空管安全管理。E-mail: 1115100525@qq.com。

价方法,达到评价整个项目风险状态的目的。高钰凯等^[5]提出采用自适应神经模糊推理系统的方法,得到较理想的输入输出关系规则库。崔玉荣等^[6]将模糊正态分布作为模糊评价等级的隶属函数分布,结合信度结构模型建立改进的模糊信度结构模型,得到工程各类突发事件的风险评价结果。陈致远等^[7]提出了一种基于模糊推理和证据理论的空中目标敌我识别方法,通过实例验证了该方法的有效性和合理性,可为相关研究提供参考。腾媛媛等^[8]分别在规则海浪波和不规则海浪波下对系统进行仿真,并把模糊控制策略的效果和传统控制策略的效果进行比较,证明了模糊控制算法有着明显的优势。方婉薇等^[9]构建基于突变理论的模糊推理系统的风险评价模型,在模糊推理系统(fuzzy inference system, FIS)中引入突变理论(catastrophe theory, CT),为有效解决内河通航风险评价问题提供了一种新思路。大量的研究再次验证了模糊推理系统在处理复杂和不确定性问题时所具有的优秀自适应能力和鲁棒性。

现以航空运行安全管理为主线,围绕 2017—

2023 年的不正常事件数据,构建不正常事件指标体系,基于突变理论的模糊推理系统风险评价模型对航空运行不正常事件进行风险评估。并在此基础上,选用 56 个有详细背景信息记录的不正常事件进行实例分析,并与云模型进行对比分析,从而验证模型的可行性和精确性。通过构建准确、可靠的风险评价模型来对不正常事件进行深入分析,并对相关指标进行模糊控制,从而实现有效的风险管理,确保航空运行安全。

1 不正常事件安全风险评价指标体系

在民航局 ASIS 系统上采集到 2017—2023 年共计 86 917 起不正常事件数据作为本文的研究对象,首先对不正常事件从事发原因、事件类型、事发月份和事发时点多维度进行分类统计研究。然后,利用 K 均值聚类算法(K -means)^[10]识别风险指引,结合问卷调查与二元、多元有序线性回归模型^[11-12]分析筛选出风险评价指标。最后,构建出航空运行不正常事件安全风险评价指标体系如表 1 所示。其中,一级指标 4 个、二级指标 12 个、三级指标 27 个。

表 1 航空运行不正常事件安全风险评价指标体系

Table 1 Safety risk evaluation indicator system for aviation operational irregularities

目标层	一级指标	二级指标	三级指标
航空运行不正常事件安全风险 U	人的因素 U1	违规 U11	突破管制指令 U111
			未及时与管制单位联系 U112
			未及时执行管制指令 U113
		错忘漏 U12	操作错误、误听指令 U121
			遗忘飞行动态 U122
			指令时机过早 U123
	技能不足 U13	机组冲突未识别 U131	
		情景意识丧失 U132	
		爬升过程中未注意有相对 U133	
	设备因素 U2	航空器 U21	机身出现明火 U211
			TCAS 故障 U212
		通导设备 U22	应答机故障 U213
陆空通信中断 U221			
环境因素 U3	气象设备 U23	盲降突发故障 U222	
		自动化系统故障 U223	
	天气 U31	发射机关机 U224	
		气象台发报链路故障 U231	
管理因素 U4	管制 U42	偏离离场程序 U311	
		绕航 U312	
	不明飞行干扰 U32	低油量 U313	
		不明应答机 U321	
军方 U41	不明飞行 U322		
	军方要求 U411		
		航空器陆空通信中断 U331	
		军航航空器影响 U341	
		沟通及信息的传递不及时、不准确 U421	
		突发事件或环境改变出现的人员适应能力不足 U422	

2 突变理论的模糊推理系统基本理论

模糊推理系统是模糊集、模糊隶属函数和模糊规则的集合,用来对决策过程进行仿真^[13]。突变理论适合研究不同稳定状态间发生转变的内在规律,且系统突变分为连续的和非连续的变化跃迁^[14]。在模糊推理系统中引入突变理论的原理是将突变理论的非线性特性应用于模糊逻辑推理过程中,提高系统对复杂不确定问题的建模与处理能力,从而更清晰地关注到系统的状态变化与突变,确保能够其更好地应对复杂问题,提高评价的准确性。基于突变理论的模糊推理系模型原理如表 2 所示。

表 2 模型理论关键点及原理

Table 2 Key points and principles of modeling theory

模型的理论关键点	原理
引入突变点	由于系统在某个控制参数超过临界值时会发生突变,突变点的产生可以将这个控制参数与模糊规则的权重或置信度相关联
定义突变函数	突变函数可以根据输入控制参数的变化来调整模糊规则的权重或置信度,也可以通过拓扑学和微分几何学的方法进行定义,以捕捉系统状态从一个稳定状态到另一个稳定状态的突变过程
调整模糊规则的权重或置信度	若控制参数超过临界值,突变函数会重新计算新的权重或置信度,并将其应用于后续模糊推理过程中

3 构建风险评价模型

构建基于突变理论的模糊推理系统的模型(ca-

tastrophe theory-fuzzy inference system, CT-FIS) 来进行风险评价,并按照如图 1 所示的流程展开。

3.1 模糊推理系统的构建

构建基于突变理论的模糊推理系统的航空运行不正常事件风险评价模型,必须要在模糊推理系统输入前对变量进行模糊化处理并在输出前解模糊化^[15]。由此构建出航空运行不正常事件风险评价模型的模糊集,并对航空运行不正常事件的风险影响因素和安全风险系统状态变化进行评价研究。

3.1.1 模糊集

首先,定义航空运行不正常事件风险评价模型的输入变量模糊集: $A = \{差, 较差, 中等, 较好, 好\}$, 输出变量所对应模糊集: $B = \{高风险, 较高风险, 中等风险, 一般风险, 低风险\}$, 便于模型后续计算和理解,将模糊集 B 的风险等级用数字等级代替。等级越高代表风险越高,低风险为 I 级风险,一般风险为 II 级风险,中等风险为 III 级风险,较高风险为 IV 级风险,高风险为 V 级风险。

对于模糊集 A , 有

$$A = \{u, \mu_A(u)\}, \mu_A(u) = f(x) \quad (1)$$

式(1)中: u 为输入变量; μ_A 为隶属函数; $\mu_A(u)$ 为 u 在集合 A 上的隶属度; $f(x)$ 为 $[0, 1]$ 上的函数。

3.1.2 推理规则

其次,需要构造一个推理规则,从而实现对输入与输出变量的关联。为了更加清楚地了解该规则,构建一个以人员系统风险推理为例的 IF-THEN 推导规则,如表 3 所示。

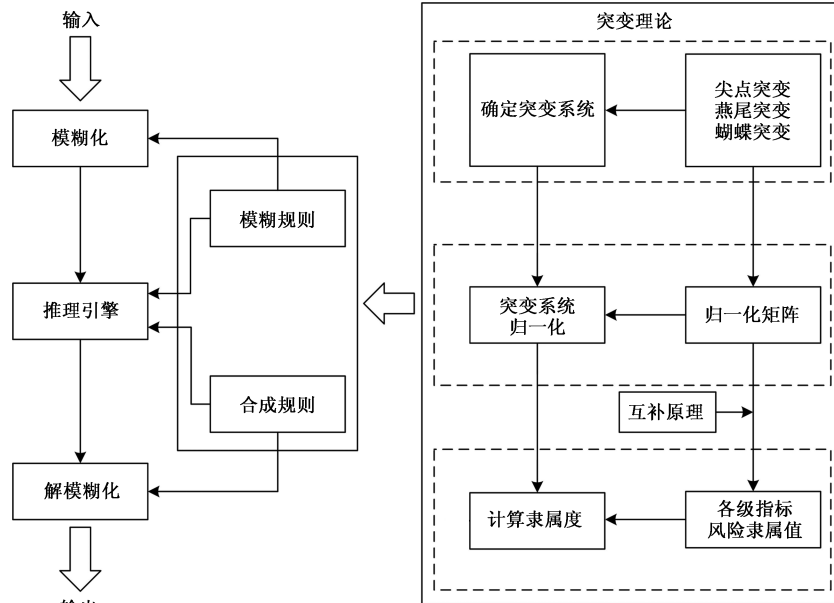


图 1 基于突变理论的模糊推理系统的风险评价流程图

Fig. 1 Flowchart of risk evaluation of fuzzy inference system based on mutation theory

表3 人员系统 IF-THEN 推导规则

Table 3 Personnel system IF-THEN derivation rules

```

IF-THEN 推导规则
% 假设我们有以下变量,它们分别表示人员的技能水平、错忘漏情况
% 和是否违规
skillLevel = '好'; % 技能水平
mistakeOmitLeak = '好'; % 错忘漏情况
violation = '好'; % 是否违规
% 使用逻辑运算符来判断系统风险等级
if strcmp(skillLevel, '好') && strcmp(mistakeOmitLeak, '好')
&& strcmp(violation, '好')
    riskLevel = '低风险(V级风险)';
else
    riskLevel = '其他风险等级'; % 如果不满足上述条件,则
    默认为其他风险等级
end
    
```

3.1.3 隶属函数

另外,在构建模糊推理系统时通过选用偏小、偏大和中间型的梯形与半梯形模糊隶属函数,可以确定各输入变量隶属于模糊集 A 的程度,并随着指标状态的不同,不断地修改和调整隶属函数。具体函数形式如图 2 所示。

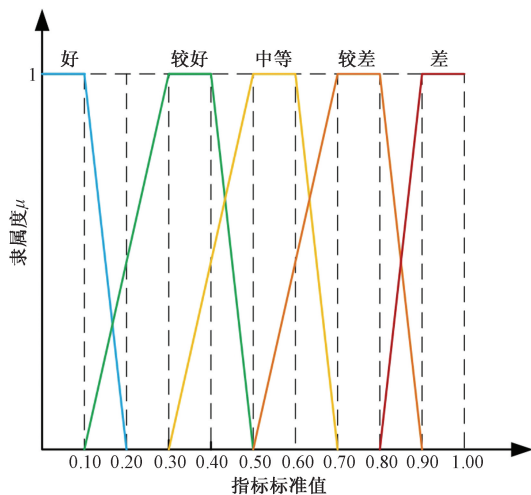


图2 梯形与半梯形模糊隶属函数

Fig. 2 Trapezoidal and semi-trapezoidal fuzzy affiliation functions

最后,依据越大越优的原则对隶属函数输出值进行解模糊化处理,来确定航空运行安全风险等级。但输出变量隶属于模糊集 B 是由突变理论的模糊推理系统内部的具体推理引擎决定,因此,构建合理的推理引擎对评价结果也至关重要。

3.2 推理引擎的构建

3.2.1 突变系统的确定

René Thom 利用突变理论对新事物的产生、发展过程中的突变与间断变化现象进行探索研究,并将突变模型总结为折叠突变、尖点突变、燕尾突变、蝴蝶突变等 7 种模型。所涉及的各系统的势函数和结构示意图分别如表 4 和图 3 所示。

不正常事件的航空运行系统是一个多层次的复杂系统,整体风险水平受到由多级指标分别构成的子系统的风险影响,传统的推理引擎很难体现出风险影响因素的微小变化和复杂的内在机制。为此,构建基于突变理论的模糊推理系统,扩展简单的 IF-THEN 规则,根据突变系统的不同特征决定每个子系统的风险状况,并按照从下级指标到上级指标的次序,逐级聚合到整个系统。

3.2.2 突变系统归一化

根据不同的突变系统选用相应的归一化公式

表4 3种突变系统的势函数

Table 4 Potential functions of the three mutant systems

突变类型	状态变	控制变	势函数
	量数目	量数目	
尖点突变	1	2	$f(x) = x^4 + ux^2 + vx$
燕尾突变	1	3	$f(x) = x^5 + ux^3 + vx^2 + wx$
蝴蝶突变	1	4	$f(x) = x^6 + ux^4 + vx^3 + wx^2 + tx$

注: u, v, w, t 为控制变量,且其重要程度按顺序递减; x 为状态变量。

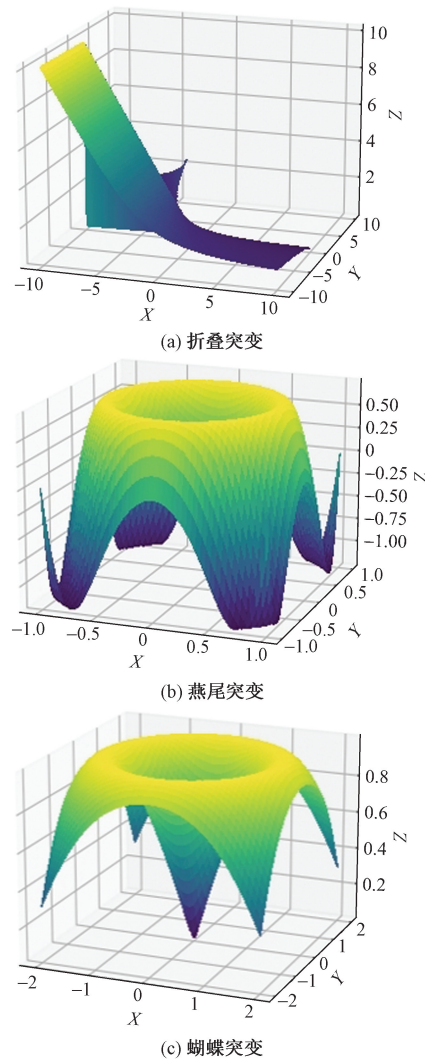


图3 突变模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the mutation model

进行处理,用尖点突变系统的势函数求出该系统的平衡曲面方程和奇点集方程为

$$4x^3 + 2ux + v = 0 \tag{2}$$

$$12x^2 + 2u = 0 \tag{3}$$

将式(2)和式(3)联立,得到尖点突变的分歧点集方程,即

$$\begin{cases} u = -6x^2 \\ v = 8x^3 \end{cases} \tag{4}$$

对式(4)进行推导求解,可得

$$\begin{cases} x_u = \sqrt{-\frac{u}{6}} \\ x_v = \sqrt[3]{\frac{v}{8}} \end{cases} \tag{5}$$

将控制变量和状态变量的取值范围均控制在 $[0, 1]$,从而使突变理论与模糊推理系统有效衔接,令 $u = -6u', v = -8v'$,推得 $x_u = \sqrt{u'}, x_v = \sqrt[3]{v'}$ 。通过上述分析,尖点突变、燕尾突变和蝴蝶突变的归一化公式为

$$\begin{cases} x_u = u^{1/2} \\ x_v = v^{1/3} \end{cases} \tag{6}$$

$$\begin{cases} x_u = u^{1/2} \\ x_v = v^{1/3} \\ x_w = w^{1/4} \end{cases} \tag{7}$$

$$\begin{cases} x_u = u^{1/2} \\ x_v = v^{1/3} \\ x_w = w^{1/4} \\ x_t = t^{1/5} \end{cases} \tag{8}$$

3.2.3 隶属度的计算

在进行了突变理论归一化之后,接下来就是对各个指标的各级风险隶属度进行计算。以基于不

正常事件的航空运行系统的人员系统—违规情况的风险状态推理为例进行推理计算,基于突变理论的模糊推理逻辑如图4所示。

二级指标人员系统风险指标 U11 下含 3 个三级风险评价指标,其相对重要度排序为 U111、U112、U113;通过对模糊评价集 A 的隶属函数进行计算,得到其对于模糊集 A 的模糊隶属函数值矩阵,采用燕尾突变对人员系统—违规情况的风险状态进行模糊推理。根据燕尾突变模型公式(7),得到指标层的燕尾突变归一值矩阵,即

$$R_{U_{11}} = \begin{bmatrix} \sqrt{f_1(U_{111})} & \sqrt{f_2(U_{111})} & \sqrt{f_3(U_{111})} & \sqrt{f_4(U_{111})} & \sqrt{f_5(U_{111})} \\ \sqrt[3]{f_1(U_{112})} & \sqrt[3]{f_2(U_{112})} & \sqrt[3]{f_3(U_{112})} & \sqrt[3]{f_4(U_{112})} & \sqrt[3]{f_5(U_{112})} \\ \sqrt[4]{f_1(U_{113})} & \sqrt[4]{f_2(U_{113})} & \sqrt[4]{f_3(U_{113})} & \sqrt[4]{f_4(U_{113})} & \sqrt[4]{f_5(U_{113})} \end{bmatrix} \tag{9}$$

在用相应的突变公式进行计算后,考虑到各级指标层的特点和实际情况,选择互补原理评价原则,当各级系统的不同指标对航空运行安全影响程度大致相同时,则可以通过计算出的各指标突变值的平均值来确定系统的整体风险状况的模糊隶属度,即

$$x = \frac{x_a + x_b + \dots + x_m}{m} \tag{10}$$

式(10)中: x_a, x_b, \dots, x_m 为计算出的指标突变值。

根据互补原则,计算人员系统—违规情况风险指标 U11 的模糊隶属函数值,如表 5 所示。其中,根据民航局相关法律法规和行业标准^[16]并结合航空运行的实际情况将风险等级进行划分为 5 个等级,等级越高代表风险越高,具体等级划分如表 6 所示。

首先通过推理得到二级指标 U11、U12、U13、U21、U22、U23、U31、U32、U33、U34、U41、U42 的风

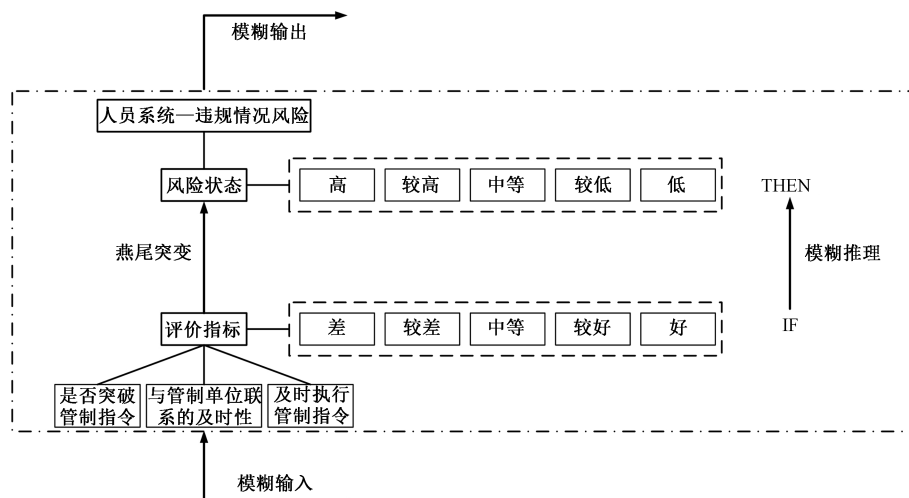


图 4 人员系统—违规情况风险模糊推理逻辑

Fig. 4 Personnel system-fuzzy inference logic for risk of non-compliance

表5 人员系统—违规情况各级风险隶属值计算
Table 5 Personnel system-calculation of risk affiliation values for all levels of non-compliance

风险级别	隶属函数值
高风险(I)	$R_{011}^1 = \frac{\sqrt{f_1(U_{111})} + \sqrt[3]{f_1(U_{112})} + \sqrt[4]{f_1(U_{113})}}{3}$
较高风险(II)	$R_{011}^2 = \frac{\sqrt{f_2(U_{111})} + \sqrt[3]{f_2(U_{112})} + \sqrt[4]{f_2(U_{113})}}{3}$
中等风险(III)	$R_{011}^3 = \frac{\sqrt{f_3(U_{111})} + \sqrt[3]{f_3(U_{112})} + \sqrt[4]{f_3(U_{113})}}{3}$
一般风险(IV)	$R_{011}^4 = \frac{\sqrt{f_4(U_{111})} + \sqrt[3]{f_4(U_{112})} + \sqrt[4]{f_4(U_{113})}}{3}$
低风险(V)	$R_{011}^5 = \frac{\sqrt{f_5(U_{111})} + \sqrt[3]{f_5(U_{112})} + \sqrt[4]{f_5(U_{113})}}{3}$

表6 风险等级与接受准则
Table 6 Risk level and acceptance criteria

风险等级	接受准则
低风险 I级风险	允许发生,无需采取措施
一般风险 II级风险	可接受:在考虑所有风险要素后,继续工作
中等风险 III级风险	审查:在采取措施进行全面管理后,继续工作
较高风险 IV级风险	不可接受:停止工作,直到已执行足够的控制措施将风险降低到可接受的水平
高风险 V级风险	完全不能接受,需立即排除风险源

险状态;其次,按照从上到下,从外到里的顺序,通过模糊推理,得到一级评价指标 U1、U2、U3、U4 的风险状态,进而计算得出目标层航空运行不正常事件 U 的风险模糊隶属值;最终,根据隶属函数值越大越优的原则,对输出变量进行解模糊化处理,得出以不正常事件为基础的航空运行系统的安全风险水平。

4 航空运行不正常事件风险评价实例分析

4.1 案例背景

为验证所建风险评价模型的有效性,在2023年全年发起调查事件的调查报告中选用56个有详细背景信息记录的不正常事件作为实例分析的样本。利用基于突变理论的模糊推理系统对各样本的风险状态进行计算,比较样本的计算结果与实际情况的一致性程度。此外,为识别基于不正常事件的航空运行安全风险防范的重点,还对各级风险评价指标进行深入分析,进而为航空运行安全管理工作提供实践和案例背景信息。

4.2 基于突变理论的模糊推理系统模型评估分析

利用所构建的风险评价模型对56个样本进行计算,将样本进行风险等级推理,根据隶属度越大

越优的原则,计算得到样本的风险等级,并将其与实际的风险等级进行对比,其一致性趋势如图5所示。其中,绿色实线代表样本的实际风险等级,红色点线代表引入突变理论的模糊推理系统的计算风险等级。可以看出,样本的计算风险等级和样本的实际风险等级基本一致。

56个样本的风险等级具体评价结果如表7所示。计算的风险等级与实际情况符合的案例数目有54个,占比96.42%,计算结果符合期望。

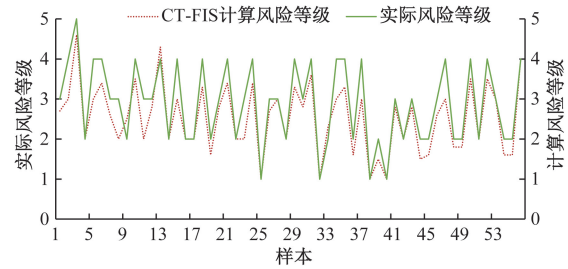


图5 实际风险等级与计算风险等级结果对比
Fig. 5 Comparison of actual risk rating and calculated risk rating results

表7 实际风险等级和计算风险等级具体结果

Table 7 Specific results of actual and calculated risk ratings

编号	事件等级	风险等级	编号	事件等级	风险等级	编号	事件等级	风险等级
1	III	II	20	III	II	39	II	I
2	IV	III	21	IV	III	40	I	I
3	V	IV	22	II	II	41	III	III
4	II	II	23	III	II	42	II	II
5	IV	III	24	IV	III	43	III	III
6	IV	II	25	I	I	44	II	I
7	III	II	26	III	II	45	II	I
8	III	II	27	III	III	46	III	II
9	II	III	28	II	II	47	IV	III
10	IV	III	29	IV	III	48	II	II
11	III	II	30	III	II	49	II	II
12	III	III	31	IV	III	50	IV	III
13	IV	IV	32	I	I	51	II	II
14	II	II	33	II	II	52	IV	III
15	IV	III	34	IV	III	53	III	III
16	II	II	35	IV	III	54	II	I
17	II	II	36	II	II	55	II	III
18	IV	III	37	IV	III	56	IV	IV
19	II	I	38	I	I			

5 风险评价模型对比分析

5.1 模型结果定量评价

构建云模型 (cloud model) 与基于突变理论的模糊推理系统模型 (CT-FIS) 进行对比,选取评价指标对所构建的两个模型进行定量对比,通过计算一致性指标 (consistency index)、信息熵 (entropy) 和相对误

差(relative error)的数值,分析模型在评价航空运行风险等级结果的稳定性和准确性。将云模型和基于突变理论的模糊推理系统的评价等级和真实等级输入各指标的数学表达式并进行计算^[17-18],公式为

$$C_i = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(y - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \right)^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i} \quad (11)$$

$$E_i = \sum_{i=1}^n P_i \log_a \frac{1}{P_i} \quad (12)$$

$$R_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - y|}{y} \quad (13)$$

式中: y_i 、 y 为模型计算的风险等级和真实风险等级; $P_i = P\{X = x_i\}$, 其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 。

一致性指标可以反映模型评价结果的稳定性和准确性,若指标结果越低,说明模型的评价结果波动越大,可能存在较大的不确定性。其次,信息熵主要用于评价模型输出的集中程度,越小的指标结果代表模型的评价性能越一致;相对误差主要用于评估模型输出等级和真实等级的偏差程度,值越小说明模型拟合能力越可靠。

综上,云模型和基于突变理论的模糊推理系统的评价指标结果如表 8 所示。

表 8 模型的评价指标结果表

Table 8 Table of results of evaluation indicators of the model

评价指标	风险评价模型	
	云模型	CT-FIS
一致性指标	0.354 7	0.345 4
信息熵	5.709 5	5.715 8
相对误差	0.462 2	0.195 5

可以发现,两个模型的一致性指标和信息熵结果相差极小,但相对误差结果差距明显,一致性指标和信息熵的结果说明云模型和基于突变理论的模糊推理系统在输出不同样本的风险等级都表现出较好的稳定性和一致性,但是,基于突变理论的模糊推理系统的相对误差值为 0.195 5 明显小于云模型的 0.462 2,意味着基于突变理论的模糊推理系统模型的评价结果与实际情况的偏差较小,具有更好的拟合度和准确性,表明该模型在评价实际风险等级时具有更高的精度。

5.2 模型结果定性评价

分别用云模型和基于突变理论的模糊推理系统对 56 个样本进行了风险等级推理并得出相应的评价结果,如图 6 所示。其中,56 个样本的真实风险等级用绿色实线表示,云模型计算出的风险等级

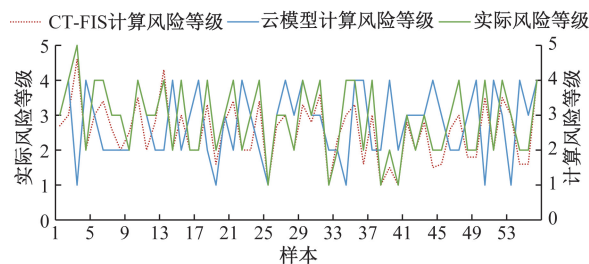


图 6 风险评价模型风险等级拟合图

Fig. 6 Risk evaluation model risk level fitting diagram

用蓝色虚线表示,基于突变理论的模糊推理系统计算出的风险等级用红色点线表示。

由图 6 可以发现,在样本 3、样本 19、样本 34、样本 50 及样本 53 内云模型的风险等级计算结果与真实风险等级拟合趋势效果较差,这是因为云模型无法充分考虑到模糊概念的复杂性和多样性,无法将模糊概念映射到数学空间,导致了样本信息丢失,使得评价结果不够全面、准确。另外,红色点线代表的 CT-FIS 模型与绿色实线代表的实际风险等级的拟合趋势相较于蓝色虚线代表的云模型要好,这与 CT-FIS 有着更强的表达能力和更好的学习能力有关,突变理论的引入可以更灵活地处理模糊概念和不确定性并且根据样本数据不断优化推理模型。

因此结合定量和定性对比分析得出,基于突变理论的模糊推理系统在评价航空运行安全风险等级时,具有更可靠评价结果,其次,在基于突变理论的模糊推理系统中还可以进一步对相关可控指标进行模糊控制,提高系统对航空运行安全风险的评价能力。

5.3 相关指标的模糊控制

在 27 个三级指标中,突破管制指令 (U_{111})、操作错误、误听指令 (U_{121})、遗忘飞行动态 (U_{122})、机组冲突未识别 (U_{131})、爬升过程中未注意有相对 (U_{133})、沟通及信息的传递出现不及时、不准确 (U_{421})、突发事件或环境改变出现的人员适应能力不足 (U_{422}) 等是可以通过机组人员、管制人员以及相关民航从业人员在工作时重点关注就能够改变不良局面的风险指标。利用基于突变理论的模糊推理系统进行模糊控制,将上述指标的输入控制为好的状态后,重新计算 56 个样本的风险等级隶属度,结果如图 7 所示,可以发现经过模糊控制后,在高风险(V)等级和较高风险(IV)等级的隶属度明显降低,总体分布由 0.83 降至 0.76 附近,隶属度的降低代表航空运行安全风险水平也得到了控制。

6 结论

在安全风险评价指标体系基础上构建了基于

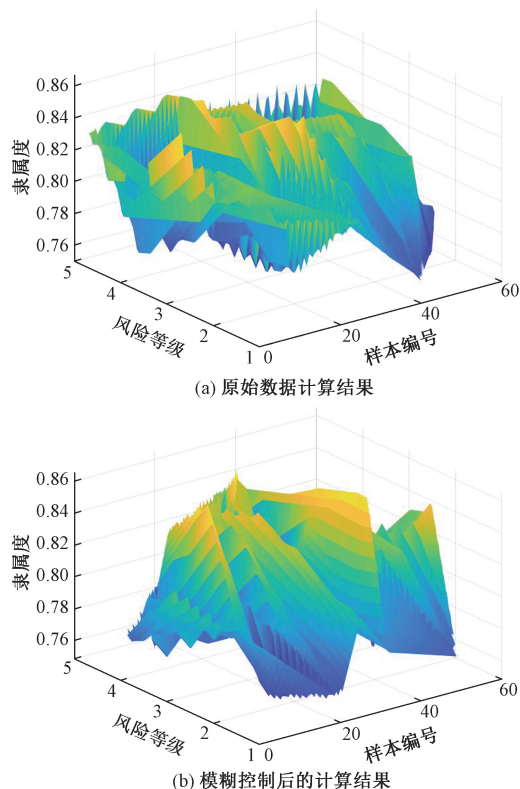


图7 模糊控制后56个样本风险等级隶属度分布

Fig. 7 Distribution of risk level affiliation of 56 samples after fuzzy control

突变理论的模糊推理系统对风险等级进行评价,将模型的输入模糊化后,对各指标引入不同的突变系统搭建不正常事件安全风险模糊推理递阶结构。以56个有详细案发信息的历史事件为样本,对各样本的风险状态进行推理,并对计算风险等级与实际情况的拟合程度进行可视化对比,来验证所构建模型的有效性。结果表明,选用基于突变理论的模糊推理系统对航空运行风险等级进行评价,可以得到准确、可靠的结果。

通过对航空运行不正常事件安全风险进行评价研究,得出较为可靠的评价结果,但也存在不足,有待进一步的深入研究。为了进一步提高航空运行的安全性和效率,后续可基于本文所构建的突变理论的模糊推理安全风险评价系统对航空运行安全做进一步预测,提高航空运行的安全保障能力。

参 考 文 献

[1] International Civil Aviation Organization (ICAO). Aircraft accident and incident investigation[S]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2016.

[2] Bagherian M. Unmanned aerial vehicle terrain following/terrain avoidance/threat avoidance trajectory planning using fuzzy logic [J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 2018, 34(3): 1791-1799.

[3] Yang Q, Chin K S, Li Y L. A quality function deployment-based framework for the risk management of hazardous material transportation process[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018, 52: 81-92.

[4] Wei D, Xu D, Zhang Y. A fuzzy evidential reasoning-based approach for risk assessment of deep foundation pit[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2020, 97. DOI: 10.1016/j.tust. 2019.103232.

[5] 高钰凯,许娣,赵涛,等. 基于自适应神经模糊推理系统的连续搅拌反应釜系统的改进广义预测控制[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(11): 4404-4409.

Gao Yukai, Xu Di, Zhao Tao, et al. Improved generalized predictive control for CSTR system based on ANFIS[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(11): 4404-4409.

[6] 崔玉荣,戴志清,刘喜峰,等. 基于模糊证据推理的南水北调工程突发事件风险评价[J]. 水力发电, 2021, 47(4): 102-107.

Cui Yurong, Dai Zhiqing, Liu Xifeng, et al. Risk evaluation of emergencies in south-to-north water transfer project based on fuzzy evidence-based reasoning[J]. Hydropower Generation, 2021, 47(4): 102-107.

[7] 陈致远,沈堤,余付平,等. 基于模糊推理和证据理论的空目标敌我识别[J]. 电光与控制, 2022, 29(6): 85-92.

Chen Zhiyuan, Shen Di, Yu Fuping, et al. Enemy identification of airborne targets based on fuzzy inference and evidence theory[J]. Electro-Optics and Control, 2022, 29(6): 85-92.

[8] 滕媛媛,陈林恺,孙友刚,等. 基于模糊逻辑系统的采矿船升沉补偿控制方法研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(24): 10444-10450.

Teng Yuanyuan, Chen Linkai, Sun Yougang, et al. Mining ship heave compensation control method based on fuzzy logic system[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(24): 10444-10450.

[9] 方婉薇,计明军,韩震,等. 模糊推理系统在内河通航风险评价中的应用——以长江干线为例[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(5): 1731-1739.

Fang Wanwei, Ji Mingjun, Han Zhen, et al. Application of fuzzy inference system in inland waterway navigation risk evaluation: the case of Yangtze River trunk line[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(5): 1731-1739.

[10] 朱卫坪,陈晓峰,张萍,等. 基于 t-SNE 降维与 k-means 聚类算法的化工厂节能减排分析[J]. 自动化应用, 2022(1): 10-13.

Zhu Weiping, Chen Xiaofeng, Zhang Ping, et al. Energy conservation and emission reduction analysis in chemical plants using t-SNE dimensionality reduction and k-means clustering algorithms [J]. Automation Applications, 2022(1): 10-13.

[11] 刘勇,李肖,施志亮,等. 基于多项 Logistic 的危化品槽罐车火灾类型判别[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(1): 231-237.

Liu Yong, Li Xiao, Shi Shiliang, et al. Discrimination of fire types for hazardous chemical tanker trucks based on multinomial logistic regression [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(1): 231-237.

[12] 高博,陈响,单仔赫,等. 基于 Logistic 回归模型的大兴安岭地区林火发生概率预测研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(11): 163-168.

- Gao Bo, Chen Xiang, Shan Zaihe, et al. A Study on forest fire occurrence probability prediction in the greater khingan range based on logistic regression model[J]. Journal of Safety Science and Technology of China, 2022, 18(11): 163-168.
- [13] 柴仕琦. 近间距盾构施工风险评估模型及应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- Chai Shiqi. Study on the risk assessment model and application for close-distance shield tunneling construction[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [14] Wang Y, Weidmann U A, Wang H. Using catastrophe theory to describe railway system safety and discuss system risk concept[J]. Safety Science, 2017, 91: 269-285.
- [15] 方婉薇. 基于模糊推理系统的长江干线水上交通安全风险评估研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2022.
- Fang Wanwei. Research on the safety risk evaluation of Yangtze River trunk waterway traffic based on fuzzy reasoning system[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2022.
- [16] 中国民用航空局. 民用航空空中交通管理运行单位安全管理规则[EB/OL]. [2024-05-30]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/MHGZ/201605/t20160530_37650.html.
- Civil Aviation Administration of China. Rules for the safety management of civil air traffic management operating units[EB/OL]. [2024-05-30]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/MHGZ/201605/t20160530_37650.html.
- [17] 朱为赟, 郝翰, 王志恒, 等. 基于复合神经网络的致密储层测井评价方法研究[J]. 科技风, 2023(31): 1-3.
- Zhu Weiyun, Hao Han, Wang Zhiheng, et al. Research on the evaluation method of dense reservoir well logging based on composite neural networks[J]. Science and Technology Wind, 2023(31): 1-3.
- [18] 田佳佳. 基于IHSDM的高速公路设计安全性评价模型及系统框架设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- Tian Jiajia. Evaluation model and system framework design for highway safety based on the interactive high-way safety design model(IHSDM)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.