

基于CRCS的空管安全风险指数评估

李佳珉, 王一帆, 黄洪运, 李梓珂, 蔡幽娜, 严欣怡

中国民航大学, 空中交通管理学院, 天津

收稿日期: 2023年4月19日; 录用日期: 2023年7月21日; 发布日期: 2023年7月31日

摘要

空中交通管制对保障飞行安全至关重要, 科学的空管安全风险评估可以有效提升安全风险管理能力, 是保证航空事业安全发展的必要前提。在欧控组织(EUROCONTROL)提出的ERCS评价体系的基础上, 运用模糊综合评价方法对其严重程度的评估过程进行优化, 建立CRCS安全风险评估模型; 通过近年空管安全报告的实例对管制运行风险的评价结果进行分析, 空管和机组原因造成的事件得分较高且危险事件较多, 占全部样本中危险事件约90%, 认为空管原因是影响运行安全的主要因素, 其次机组自身原因也存在较大隐患。CRCS综合考虑主客观因素, 平衡了原本数据两极分化严重的现象。根据安全风险评价的结果可有效监控空管部门的安全风险态势, 并为其制定的预防对策提供科学分析依据。

关键词

空中交通管制, 安全风险评估, CRCS, 模糊综合评价

Air Traffic Control Safety Risk Index Assessment Based on CRCS

Jiamin Li, Yifan Wang, Hongyun Huang, Zike Li, Youna Cai, Xinyi Yan

College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin

Received: Apr. 19th, 2023; accepted: Jul. 21st, 2023; published: Jul. 31st, 2023

Abstract

Air traffic control is very important to ensure flight safety. Scientific air traffic control safety risk assessment can effectively improve the ability of safety risk management, which is a necessary prerequisite to ensure the safe development of aviation. On the basis of ERCS evaluation system proposed by EUROCONTROL, the fuzzy comprehensive evaluation method is used to optimize the evaluation process of its severity, and the CRCS safety risk assessment model is established. Through the examples of air traffic control safety reports in recent years, the evaluation results of

the risk of control operation are analyzed. It is found that the incidents caused by air traffic control and the air traffic control unit have higher scores and more dangerous incidents, accounting for about 90% of all the dangerous incidents in the samples. It is believed that the air traffic control reason is the main factor affecting the operation safety, and then the air traffic control unit itself also has a big hidden danger. CRCS takes subjective and objective factors into consideration and balances the serious polarization of the original data. According to the results of safety risk assessment, the safety risk situation of air traffic control department can be effectively monitored and scientific analysis basis can be provided for its prevention countermeasures.

Keywords

Air Traffic Control, Risk Assessment, CRCS, Fuzzy Comprehensive Evaluation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来随着民用航空事业的高速发展,全球民航产业发展整体趋于成熟,各种高新科技也逐步应用于民航。但安全仍是民航业整体关注的热点,空中交通管理(以下简称空管)运行环境日益复杂,并且每年的安全信息统计中仍有多起事故以及不安全事故征候发生,空管安全风险评估标准也愈发成为交通运输业整体发展方向的重要考虑因素。所以针对我国民航空管,必须建立一套科学完善的安全管理体系,其中对安全风险评估的研究可以有效实施风险监控以及预警预控。

目前国内外对于空管安全风险评估研究较多,且都取得了重要的成果。在国外,L. Flavior 等通过随机 Petri 网方法对空管系统安全进行了评价,从系统学整体角度分析了民航运行安全风险性[1]; Rosa María Arnaldo Valdés 等利用贝叶斯推理和层次结构,分析不同样本数据,建立统计和估计预测模型,预测未来的安全性[2]; Ma 等使用粗糙集和 BP 神经网络对空中交通安全进行评估[3]。同时,国内姚登凯等建立了遵循计划(P)-实施(I)-检查(C)-处理(A)的安全评价体系,并采用模糊 Petri 网方法,并引入风险等级阈值和层次分析法,快速得到了评价结果[4]。廖勇针对风险评估的不确定性,在概率论的基础上,结合专家群决策理论与最优化理论,建立了一种空管概率安全风险评估模型[5]; 杨越、马博凯等以近 20 年国外空管的不安全事件为样本,利用粗糙集理论和贝叶斯网络两种方法从感知、记忆、计划决策和响应执行 4 个认知层面讨论分析不同管制情境下的空管安全风险因素[6]; 陈芳等利用 HFACS 模型识别管制员人为风险,运用毕达哥拉斯模糊集量化指标,将定性和定量信息相结合,建立了毕达哥拉斯模糊和改进 TOSIS 风险评估模型[7]。倪晓梅等以飞行运行程序为脉络,甄别出航班运行过程中存在的各种风险因素,并基于历年的不安全事件统计数据,将风险因素分类划分为机组、航路、机场和航空器等 4 方面,将风险评估指标体系转化成贝叶斯网络模型,借助统计数据后的先验概率,快速得出了航班不安全事件发生预测值和基本风险因素的影响比重[8]。

空管安全风险评估大都以安全事件整体为研究对象,将事件的致因大体分为“人机环管”四个方面,从而建立相应评价指标,设定每个指标的权重,从严重度以及风险度等方面对每个安全事件的安全风险等级进行打分评判。该方法可以清楚地表示出导致灾害事故的各种因素之间的因果及逻辑关系,在工作中存在一定的实用性。但也存在未能考虑事件保护机制在阻碍事件恶化时的影响,对评估安全预防机制方面存在欠缺。针对此,本文采用基于模糊数的 CRCS 评估模型建立了一套安全风险评估体系。

2. CRCS 评估模型

CRCS (China Risk Classification Scheme)评估模型是基于对 ERCS (European Risk Classification Scheme) [9]进行改进的安全风险评估方法。ERCS 是根据 REASON 模型的原理,即对于每次事件的评估应确定所有保护该事件的屏障被击穿后可能导致的的最坏的事故结果,并由此得出其权重,并综合得出事件的安全风险等级。CRCS 是在 ERCS 方法的基础上对事故严重程度进行改进,如图 1 所示,使之更符合实际运行情况。

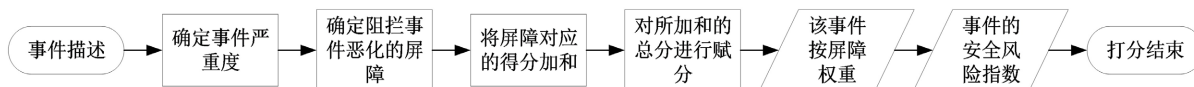


Figure 1. The flowchart of CRCS

图 1. CRCS 打分流程图

2.1. 确定事件严重程度

ERCS 所使用的严重程度判别标准,如表 1 所示。ERCS 欧洲等级分类,过于宽泛,不适于我国航空运行现状。故使用国内现行飞行事故等级对其进行优化,将事件的预计最严重事故结果(S)分为四类,如表 2 所示。专家根据事件描述,结合事件发生原因,判断事故可能导致的最严重结果并给出得分。将四类事件相应得分规定为 10-7.5/7.5-5/5-2.5/2.5-0。专家进行打分时,在根据事件描述确定事件最严重结果类别后,根据经验在相应打分区间内给出分数。

Table 1. Classification of the potentially consequences of events by ERCS

表 1. ERCS 预计事件严重后果等级分类

事件等级	A	E	I	M	S	X
等级描述	不可能发生事故	飞机轻微损伤, 0 可能死亡人数	1 人死亡	2~19 人死亡	20~100 人死亡	超过 100 人死亡

Table 2. Classification of the potentially most serious consequences of accidents by CRCS

表 2. CRCS 预计最严重事故结果等级分类

事件等级	特别重大飞行事故	重大飞行事故	一般飞行事故	基本不造成危害
等级描述	死亡 40 人及以上	死亡 39 人及其以下	重伤 10 及其以上	基本不造成危害

因民航事故的特殊性,打分数据易出现事件结果两极分化严重的情况。故将事件预计的最严重程度作为综合严重程度的主要判断指标,并加入客观指标,即易发生的人为因素导致的工作差错(W)。采用模糊综合评价的方法,将两项指标综合考虑,使严重程度打分更符合实际情况,提高打分标准的适用性。主客观因素的综合判断使原本的两极分化严重的的数据结果更为均衡,分布特征更为显著,使数据更具有参考价值。

根据《民航空管安全管理体系指导手册(试行)》[10],将表 3 作为客观因素的评判依据:

Table 3. Work errors caused by human factors

表 3. 人为因素导致的工作差错

	可忽略的	轻微的	严重的	危险的	灾难性的
定性描述	几乎没有影响	工作受到影响但并未造成不良后果	造成工作差错	造成事故征候	造成事故

根据模糊综合评价的结果得到的分数会根据 A/B/C/D/E 五个等级进行划分,分别对应 10-8/8-6/6-4/

4-2/2-0, 从而得到事件综合严重程度等级。

2.2. 确定事件屏障

事件屏障(Barrier), 如表 4 所示, 是基于 REASON 模型预防事故发生的保护措施。屏障存在的目的是防止事件向更严重的程度去发展, 其具有预防事故真实发生和抑制事故危害蔓延的作用。故以屏障来代表事件对应的发生概率, 通过评估屏障是否被击穿并计算对应的权重, 如表 5 所示, 同时与上文确定的严重程度等级相结合, 形成事故分类标准与指数。

Table 4. Barrier

表 4. 事件屏障

编号	屏障类型	得分
a	飞机、设备和基础设施的设计: 包括维护和纠正、操作支持、预防可能导致事故的技术因素问题	5
b	战术规划: 包括飞行前的组织和个人规划或其他能够减少事故原发生可能性和导致事故的因素的业务活动	2
c	法规、程序、流程: 包括有效的、可理解的和可用的法规、程序和遵守的流程(不包括使用恢复屏障程序(第六项))	3
d	态势感知和行动: 包括人类对操作方面意外事件的警惕, 以确保识别操作危险和防止事故的有效行动	2
e	预警系统: 可以防止事故发生	3
f	在事故发生之后, 受到损失的单位和个人能够(不确定是否是自行)进行恢复。例如, 周边建筑物受损, 能够进行修复	1
g	保护措施: 当事件发生时, 事件被合理处置, 使其造成的危害减小或不会进一步扩大	1
h	低能量事故: 其与“保护措施”得分相同, 但仅适用于低能量重点风险区(地面损坏、冲偏出, 伤害)不适用于所有其他关键风险领域	1

根据事件描述, 将所选屏障项目对应得分加和(0~18 之间)得到屏障总分, 将得到的屏障总分对照表 5, 获得对应屏障权重。

Table 5. Barrier weight

表 5. 屏障权重

屏障权值之和	屏障权重
0 无屏障剩余, 可能发生了最严重的事故后果	0
1~2	1
3~4	2
5~6	3
7~8	4
9~10	5
11~12	6
13~14	7
15~16	8
17~18	9

2.3. 确定事件安全风险指数

将确定的事件严重程度等级和确定的屏障权重相结合得到事件风险分类，参照欧洲事件严重程度标准，确定风险矩阵。形成了事件风险评估分类标准，并得到相应分数，如表 6 所示。

Table 6. The safety risk score matrix

表 6. 风险矩阵

CRCS 分数	A9	A8	A7	A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0
数值	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000	10,000	100,000	100,000
CRCS 分数	B9	B8	B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0
数值	0.0005	0.005	0.05	0.5	5	50	500	5000	50,000	500,000
CRCS 分数	C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	C0
数值	0.0001	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000	10,000	100,000
CRCS 分数	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
数值	0.00001	0.0001	0.001	0.1	1	10	100	1000	10,000	100,000
CRCS 分数	E9	E8	E7	E6	E5	E4	E3	E2	E1	E0
数值	0.000001	0.00001	0.0001	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000

3. 模糊综合评价

3.1. 评价指标集的建立及模糊化

评价指标集为描述被评价对象的 p 个指标，常用集合 $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$ 表示。本文引入模糊理论，将预计事故最严重结果(S)和人为因素导致的工作差错(W)作为模糊变量，模糊变量，采用模糊语言术语对其等级进行描述。对于 S，采用 $V_1 = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} = \{\text{很高(VH)}, \text{高(H)}, \text{中(M)}, \text{低(L)}, \text{很低(VL)}\}$ ，根据专家打分的分数对应于 5 种语言变量。对于 W，采用

$V'_2 = \{v'_1, v'_2, v'_3, v'_4, v'_5\} = \{\text{很高(VH)}, \text{高(H)}, \text{中(M)}, \text{低(L)}, \text{很低(VL)}\}$ ，分别对应 2.2 中 5 种对应类型。事件打分的等级判断可根据打分实际需要进行必要的调整。同理，最终严重程度也相应分为五个等级， $S_3 = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5\} = \{\text{很高(VH)}, \text{高(H)}, \text{中(M)}, \text{低(L)}, \text{很低(VL)}\}$ 。最终得出的综合严重程度(F)分为五个等级 A/B/C/D/E，最终按 10-8/8-6/6-4/4-2/2-0 进行分类，从而确定严重程度。

模糊化是指采用模糊数将明确集合转换为模糊集合，从而对主观和不确定的信息进行量化处理。常用的模糊数有三角模糊数、梯形模糊数、指数型模糊数等[11]。由于三角模糊数在应用中计算简便，且其分布特点使最模糊推理结果类别特征更为明显，有利于最终严重程度的分类，故本文采用三角模糊数。三角模糊数的隶属度函数曲线，如图 2 所示。

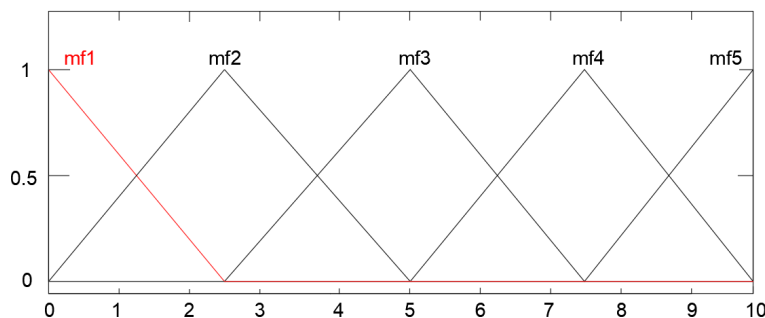


Figure 2. Membership function curve of triangular fuzzy number

图 2. 三角模糊数的隶属度函数曲线

3.2. 模糊推理规则

本文采用多输入单输出模糊推理规则，即 Mamdani 推理消顶法。一般形式为：

前提 1：如果 A 且 B ，那么 C

前提 2：现在是 A' 且 B'

结论：

$$C' = (A' \cap B') \circ [(A \cap B) \rightarrow C] \quad (1)$$

隶属度函数

$$\mu \cdot \cap \cdot (x, y) = \mu_A(X) \wedge \mu_B(y) \quad (2)$$

“如果 A 且 B ，那么 C ” 的隶属度表达式为：

$$[\mu_A(X) \wedge \mu_B(y)] \quad (3)$$

其模糊关系矩阵为 $R = AB * C$ ，矩阵的计算变为：

$$[\mu_A(X) \wedge \mu_B(y)] \wedge \mu_C(z) \quad (4)$$

规则推理结果为：

$$\begin{aligned} \bullet' &= (A' \cap B') \circ [(A \cap B) \rightarrow C] \\ &= [A' \circ (A \rightarrow C)] \cap [B' \circ (B \rightarrow C)] \end{aligned} \quad (5)$$

其隶属度函数为：

$$\begin{aligned} \mu_{C'}(z) &= \bigvee_x \{ \mu_{A'}(x) \wedge [\mu_A(x) \wedge \mu_C(z)] \} \cap \bigvee_y \{ \mu_{B'}(y) \wedge [\mu_B(y) \wedge \mu_C(z)] \} \\ &= \bigvee_x \{ \mu_{A'}(x) \wedge \mu_A(x) \} \wedge \mu_C(z) \cap \bigvee_y \{ \mu_{B'}(y) \wedge \mu_B(y) \} \wedge \mu_C(z) \\ &= (\alpha_A \wedge \mu_C(z)) \cap (\alpha_B \wedge \mu_C(z)) \\ &= (\alpha_A \cap \alpha_B) \wedge \mu_C(z) \end{aligned} \quad (6)$$

多输入单输出模糊推理规则的含义为，分别求出 A 对 A' ， B 对 B' 的隶属度 α_A ， α_B ，并且取其中小的一个，作为模糊推理前件的隶属度，再以此为基准推理切割后件的隶属度函数，便得到结论 C' 。规则设定如下：

初始规则：根据事件预计最严重结果的五个等级对应推理出最终严重程度综合评价的五个等级。

修正规则：在初始规则的基础上，考虑到人为因素对于事件预计最严重结果的影响，加入修正规则，即给事件的人为因素赋予影响事件最严重结果发生的能力，在低等级人为因素的作用下，进行综合评价等级判断时，最终结果将对应降低一个等级，原本已是最低等级的最终结果将不受影响；反之，在高等级人为因素的作用下，最终结果将对应提高一个等级，原本已是最高等级的将不做处理。其余都根据对应关系进行模糊推理即可。

最终规则设定效果如图 3 所示。

3.3. 解模糊化方法

经过隶属度函数和模糊规则的运算得出的结果是模糊量，但执行机构无法根据模糊量来施加控制效果。要执行控制，就要将模糊量映射到精确量，即解模糊化。接模糊化实现了从模糊集合到输出精确集合的映射[10]。解模糊化有很多方法，如面积平均法，加权模糊均值，最大隶属度法和重心法。其中重心

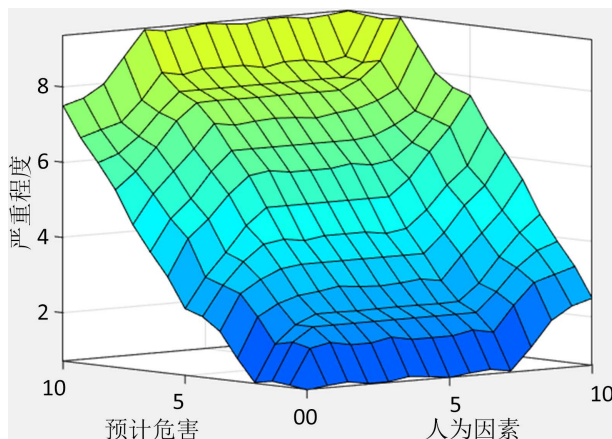


Figure 3. Inference rules of triangular fuzzy numbers
图 3. 三角模糊数的推理规则

法由于简单实用、易于理解被广泛使用[12]。重心法是指采用隶属函数曲线与横坐标围成面积的重心为解模糊数值。重心法的输出精确量由下式计算：

$$y = \frac{\int_{u_1}^{u_2} \mu_A(u) du}{\int_{u_1}^{u_2} du} \tag{7}$$

y——推理结果中各元素隶属度的重量平均值。

将解模糊化后的数据，按照 2.1 中确定的严重程度进行分类。

4. 实例分析

本文以安全事件为例来验证改进 ERCS 的 CRCS 评估模型的可行性与有效性。样本数据主要来源于中国民航安全网中空管报告的相关安全事件，样本原始数据包括 2017~2021 年全国范围内的民航安全事件的简要经过，事件原因，事件类型，发生地区等重要信息。对事件进行筛选划分后，选出 120 个事件，对事件的主观预计可能发生的最严重程度以及客观人为因素导致的工作差错的严重程度，请专家逐项进行打分评判，并采用模糊综合评价得出两组数据的综合严重程度。同时根据事件描述进行分析，得出遏制事件发生的对应屏障以及权重，结合综合严重程度便得出事件的安全风险指数，通过风险指数大小，可以显示出该事件的风险程度。

4.1. 安全风险评价

报告中的安全事件按照导致事件发生主要原因进行分类，即从空管工作差错，机组工作差错，机械、地面保障差错，天气及其他因素，管理、航务及机务因素五个方面进行分类。在将事件分类后通过专家经验对事件的严重程度进行评判赋分。以下选取各因素中的 5 个事件共 120 个事件进行举例，事件名称为 $J_i, K_i, L_i, M_i, N_i (i=1,2,3,\dots,9)$ ， i 表示事件类型，如表 7 所示：

Table 7. The type of accidents and severity

表 7. 事件类型及严重程度

事件	人为因素导致的工作差错					预计事故最严重程度				
	J_1	K_1	L_1	M_1	N_1	J_1	K_1	L_1	M_1	N_1
空管	4	7	6	6	2	8	8	5	3	5

Continued

事件	J ₂	K ₂	L ₂	M ₂	N ₂	J ₂	K ₂	L ₂	M ₂	N ₂
飞行机组	8	8	6	6	8	8	8	6	6	8
事件	J ₃	K ₃	L ₃	M ₃	N ₃	J ₃	K ₃	L ₃	M ₃	N ₃
其他	5	5	5	5	5	7	7	9	9	8
事件	J ₄	K ₄	L ₄	M ₄	N ₄	J ₄	K ₄	L ₄	M ₄	N ₄
天气	5	5	4	5	5	8	8	6	7	8
事件	J ₅	K ₅	L ₅	M ₅	N ₅	J ₅	K ₅	L ₅	M ₅	N ₅
地面保障	4	3	4	2	3	2	2	2	2	4
事件	J ₆	K ₆	L ₆	M ₆	N ₆	J ₆	K ₆	L ₆	M ₆	N ₆
机械	10	9	8	10	5	8	8	8	8	6
事件	J ₇	K ₇	L ₇	M ₇	N ₇	J ₇	K ₇	L ₇	M ₇	N ₇
航务	6	6	4	8	8	4	4	2	8	8
事件	J ₈	K ₈	L ₈	M ₈	N ₈	J ₈	K ₈	L ₈	M ₈	N ₈
机务	3	9	9	4	9	2	10	10	2	10
事件	J ₉	K ₉	L ₉	M ₉	N ₉	J ₉	K ₉	L ₉	M ₉	N ₉
管理	10	8	6	6	7	2	10	2	8	6

利用模糊数得出综合严重程度如下，如表 8 所示：

Table 8. Comprehensive severity
表 8. 综合严重度

综合严重度					
事件	J ₁	K ₁	L ₁	M ₁	N ₁
空管	7.609856	7.594421	5	3.165323	4.414894
综合严重程度等级	B	B	C	D	C
事件	J ₂	K ₂	L ₂	M ₂	N ₂
飞行机组	7.609856	7.609856	6.040268	6.040268	7.609856
综合严重程度等级	B	B	B	B	B
事件	J ₃	K ₃	L ₃	M ₃	N ₃
其他	6.914894	6.914894	8.03328	8.03328	7.594421
综合严重程度等级	B	B	A	A	B
事件	J ₄	K ₄	L ₄	M ₄	N ₄
天气	7.594421	7.594421	6.040268	6.914894	7.594421
综合严重程度等级	B	B	B	B	B
事件	J ₅	K ₅	L ₅	M ₅	N ₅
地面保障	2.390144	2.405579	2.390144	2.405579	3.959732
综合严重程度等级	D	D	D	D	D

Continued

事件	J ₆	K ₆	L ₆	M ₆	N ₆
机械	9.320955	8.03328	7.594421	9.320955	6.040268
综合严重程度等级	A	A	B	A	B
事件	J ₇	K ₇	L ₇	M ₇	N ₇
航务	4.68578	4.68578	2.082244	7.210846	7.210846
综合严重程度等级	C	C	D	B	B
事件	J ₈	K ₈	L ₈	M ₈	N ₈
机务	2.082244	8.454325	8.454325	2.082244	8.454325
综合严重程度等级	D	A	A	D	A
事件	J ₉	K ₉	L ₉	M ₉	N ₉
管理	3.708333	8.583246	2.082244	7.73416	6.040268
综合严重程度等级	D	A	D	B	B

得出事件的对应的严重程度等级并与屏障相结合，如表 9 所示：

Table 9. Security risk level

表 9. 安全风险等级

安全风险等级					
事件	J ₁	K ₁	L ₁	M ₁	N ₁
空管	B7	B4	C6	D7	C5
事件	J ₂	K ₂	L ₂	M ₂	N ₂
飞行机组	B5	B5	B7	B7	B8
事件	J ₃	K ₃	L ₃	M ₃	N ₃
其他	B7	B7	A9	A8	B9
事件	J ₄	K ₄	L ₄	M ₄	N ₄
天气	B8	B8	B6	B7	B8
事件	J ₅	K ₅	L ₅	M ₅	N ₅
地面保障	D6	D8	D7	D7	D8
事件	J ₆	K ₆	L ₆	M ₆	N ₆
机械	A5	A5	B6	A6	B4
事件	J ₇	K ₇	L ₇	M ₇	N ₇
航务	A7	A7	B5	A7	B7
事件	J ₈	K ₈	L ₈	M ₈	N ₈
机务	D6	A6	A8	D5	A6
事件	J ₉	K ₉	L ₉	M ₉	N ₉
管理	D8	A6	D8	B8	B5

根据表 6 得出事件的安全风险指数，如表 10 所示：

Table 10. Safety risk index
表 10. 安全风险指数

安全风险指数					
事件	J ₁	K ₁	L ₁	M ₁	N ₁
空管	0.05	50	0.1	0.001	1
事件	J ₂	K ₂	L ₂	M ₂	N ₂
飞行机组	0.005	5	0.05	0.05	0.005
事件	J ₃	K ₃	L ₃	M ₃	N ₃
其他	0.05	0.05	0.05	0.001	0.005
事件	J ₄	K ₄	L ₄	M ₄	N ₄
天气	0.005	0.005	0.5	0.05	0.005
事件	J ₅	K ₅	L ₅	M ₅	N ₅
地面保障	0.01	0.0001	0.001	0.001	0.0001
事件	J ₆	K ₆	L ₆	M ₆	N ₆
机械	1	1	0.001	0.001	0.1
事件	J ₇	K ₇	L ₇	M ₇	N ₇
航务	0.01	0.01	0.1	0.05	0.05
事件	J ₈	K ₈	L ₈	M ₈	N ₈
机务	0.01	1	0.01	0.1	1
事件	J ₉	K ₉	L ₉	M ₉	N ₉
管理	0.0001	1	0.0001	0.05	0.05

4.2. 对比分析

将单输入对照结果，如图 4 所示，与采取模糊理论对风险评价体系进行优化后的数据结果，如图 5 所示，进行对比，可做出如下分析：

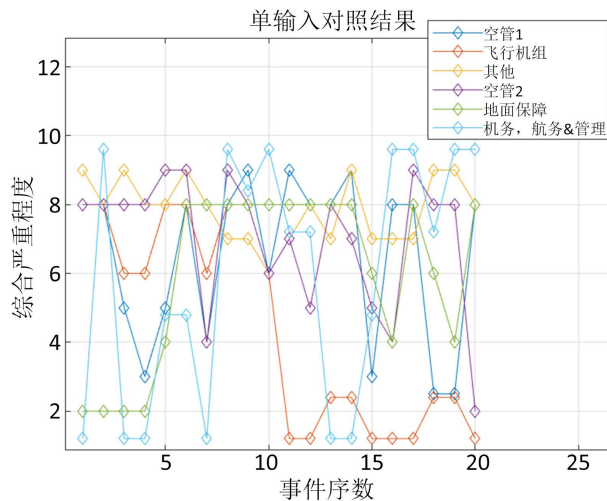


Figure 4. Single input control group

图 4. 单输入对照结果

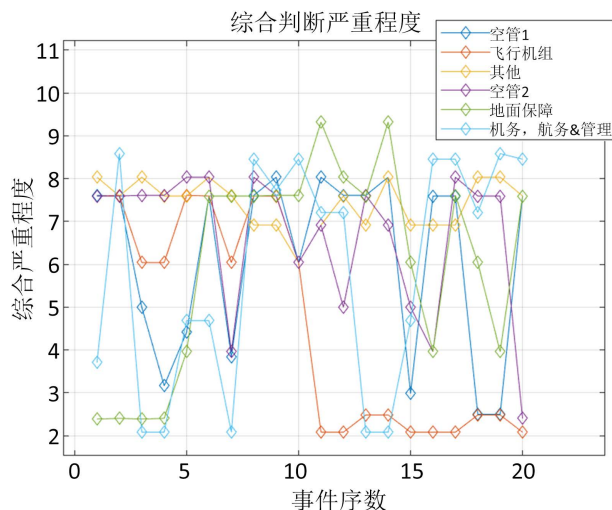


Figure 5. The severity of the combined judgment
图 5. 综合判断严重程度

空管方面：从图线中可看出，一旦出现安全事故，严重程度等级都较高，基本大于 7.5。因此说明空管的容错率较低，一旦出现指挥失误所导致的风险等级都较高。需要强化规范空管方面的空中交通管理服务职责。

飞行机组方面：飞行机组的严重程度等级要么极大要么极小，证明飞行机组在飞行过程中的操作对于降低风险等级具有极为重要的关键作用，个人主观性对于风险等级的影响较大。应增强对于飞行机组成员的培训，以期降低安全风险等级。

天气因素：天气的恶劣程度对于安全风险等级波动影响极大，但将屏障影响加入后风险等级都能得到有效降低，且基本处于 7~8 之间，说明天气因素的人为可控程度较为可靠和完善，天气因素并不会造成安全风险等级的极端增大。

机械与地勤：通过样本严重程度与考虑了屏障情况的严重程度对比可看出，加入了屏障的影响后，对于风险等级的改变程度不大，因此可见地勤服务与机械零部件的完好情况对于是否能够正常放飞具有极重要意义，一旦出现故障，难以在飞行阶段采取措施降低风险等级。因此放飞前的检修与准备工作需要细致与彻底地排查。

因此，利用模糊化方法进行评判具有以下优势：

使风险评价得分更具可靠性。依据多因素模糊化分析得出的输出数据结果，较单输入而产生的输出结果而言更加客观和准确。对确定安全风险的水平具有显著作用。

人因作为航空安全中的极为重要的因素之一，其风险水平高低对于确定风险严重程度得分影响程度有极大影响。以事件严重程度作为主体，将人因作为重要影响指标，对于建立的评价模型稳健性有极大提高，也符合理论分析的合理性。

利用两种得分数据所做出的图线可得，经过模糊化处理后的图线水平更趋于一个确定的范围，对于某一类(如空管、军方等)影响指标的整体风险水平能够得到更加稳定的区间，易于得出各类影响指标对于整体安全风险水平的重要程度。

数据的离散程度得到一定的减小，更趋向于现实人为感知的程度，以准确的数据化形式消除了人作为打分主体的主观感知高低。

民航安全事件定量分析因其从主观层面不易于对等级进行评估，因此通过精确的数字手段处理模糊的安全风险评价对象，能对蕴藏信息呈现模糊性的数据做出比较科学、合理、贴近实际的量化评价。且

其模糊化后的得分是一个矢量，而不是一个点值，包含的信息比较丰富，既可以比较准确地刻画安全风险水平，又可以进一步加工，得到辅助决策的参考信息。

5. 结论

本文应用 CRCS 方法对空管报告的相关事件中五个指标分别进行安全风险评估。据表 6，可知最终得分超过 50，即为存在危险，最终得分超过 5000，即为存在严重危险，在最终数据结果中筛选出最终得分超过 50 的事件，如表 11 所示。

Table 11. Final score over 50 security incident data

表 11. 最终得分超过 50 的安全事件数据

人为因素	严重程度	屏障	严重程度得分	类别	最终得分	事件原因
8	9	2	8.03328	A2	10000	空管
8	9	3	8.03328	A3	1000	空管
6	8	3	7.609856	B3	500	空管
8	8	3	7.594421	B3	500	空管
5	7	3	6.914894	B3	500	空管
7	8	3	7.594421	B3	500	机械
3	1.2	2	2.082244	D2	100	飞行机组
3	1.2	2	2.082244	D2	100	飞行机组
2	1.2	2	2.082244	D2	100	飞行机组
3	1.2	2	2.082244	D2	100	飞行机组
3	1.2	2	2.082244	D2	100	飞行机组
3	1.2	2	2.082244	D2	100	飞行机组
7	9	4	8.03328	A4	100	空管
7	8	4	7.594421	B4	50	空管
5	6	4	6.040268	B4	50	空管
8	8	4	7.594421	B4	50	空管
7	8	4	7.594421	B4	50	空管
5	8	4	7.594421	B4	50	空管
5	8	4	7.594421	B4	50	空管
6	8	4	7.609856	B4	50	地面保障
5	6	4	6.040268	B4	50	机械

通过多指标安全综合评估研究，可以得出相关结论：

1) 人为因素依然是影响管制运行安全的主要原因。据表 7，可知分数最高的前 5 项均为空管因素在成的事件。据得分排序知，其次为机械原因和机组原因，但机械原因的数量并不多，可知机械原因造成的危险事件发生概率不大。机组原因的事件得分高，数量多。因此可知空管原因与机组原因对民航安全存在潜在的风险。

2) 通过实例将 ERCS 与 CRCS 对比分析，体现了模糊综合评价用于改良方法的优势所在。它能平衡严重程度两极分化现象，使评估结果更科学。

3) CRCS 方法与传统安全风险评估方法相比, 从阻碍事件进一步恶化的屏障进行分析得出的安全风险等级既反映出该事件的严重性, 同时也可以体现出预防措施的有效性。可以直观地反映出民航空管运行整体的安全性, 为进一步优化和制定防护和控制措施提供了科学的分析。

4) 该方法存在人为经验影响, 评估结果存在过多主观性, 后续研究应考虑专家评估的置信度如利用内部一致性检验, Kappa 系数等方法提出改良措施。

参考文献

- [1] Flavior, L. and Camargo, J.J.B.A. (2011) Safety Assessment Methodology Applied to CNS/ATM-Based Air Traffic Control System. *Reliability Engineering & System Safety*, **96**, 727-738. <https://doi.org/10.1016/j.res.2011.02.007>
- [2] Valdés, R.M.A. Comendador, V.F.G., Sanz, L.P. and Sanz, A.R. (2018) Prediction of Aircraft Safety Incidents Using Bayesian Inference and Hierarchical Structures. *Safety Science*, **104**, 216-230. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.01.008>
- [3] Ma, L., Li, W.A. and Geng, Z.X. (2019) Air Traffic Safety Risk Assessment Based on Rough Set and BP Neural Network. *Proceedings of the 13th International Conference on Software Technologies*, Porto, Portugal, 26-28 July 2018, 863-870. <https://doi.org/10.5220/0006889008970904>
- [4] 姚登凯, 王晴昊, 甘旭升. 改进模糊 Petri 网在空管安全风险评估中的应用[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(2): 413-417.
- [5] 廖勇. 空管概率风险评估模型研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(4): 257-264.
- [6] 杨越, 马博凯, 曹宇轩. 国外空管不安全事件中的人误风险分析[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(12): 38-45.
- [7] 陈芳, 沈芮宇, 杨诗琪. 基于毕达哥拉斯模糊和改进 TOPSIS 的管制员人为风险评估[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(5): 2093-2100.
- [8] 倪晓梅, 王华伟, 熊明兰, 王峻洲. 基于文本挖掘的民航事件风险评估[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(6): 73-79.
- [9] Eurocontrol, A. (2020) The Common European Risk Classification Scheme. *Official Journal of the European Union*, **416**, 4-10.
- [10] 中国民用航空局空管行业管理办公室. 民航空管安全管理体系建设指导手册(第二版) [EB/OL]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/201511/t20151102_7979.html, 2009-08-05.
- [11] 匡雅, 邹树梁, 唐德文, 陈骥, 黎欢. 基于模糊 FMEA 法的乏燃料剪切机剪切装置风险评估[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(5): 15-20. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2016.05.003>
- [12] 李冠臻. 基于模糊控制器的跟驰模型实验研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2020. <https://doi.org/10.27272/d.cnki.gshdu.2020.004175>