

基于云模型的空中交通管制的安全隐患 分级评估模型

廖勇, 张丹

(中国民用航空飞行学院空中交通管理学院, 四川 广汉 618307)

摘要: 隐患排查是确保空中交通管制安全的重要手段,对隐患进行分级评估是提供隐患治理的重要依据。以管制的隐患为研究对象,以专家评估为基础,构建基于云模型的安全隐患分级模型。针对规章对隐患分级较为粗略的问题,为了提高评价的精度,在规章分级的基础上构建隐患评价等级。为了提高评价的准确性,采用专家群决策的方法对隐患等级进行评估。为了提升评估的客观性,在定性评估的基础上,引入云模型,开展定量评估。最后通过示例展示评估流程。研究结果表明,基于云模型的方法具有良好的可行性和适用性。

关键词: 云模型; 隐患分级; 风险评估; 空中交通管制

中图分类号: U8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)08-0024-07

空中交通管制的主要作用为防止事故以及保障飞行有序通畅,空中交通管制的安全隐患治理关乎着公众生命财产安全。为了实现安全隐患零容忍的目标,空管各部门建立了安全风险分级管控和隐患排查双重预防工作机制,安全隐患排查治理作为该工作机制的三大支柱之一,通过识别并评价出一般安全隐患和重大安全隐患,并根据不同等级的隐患采取对应的治理措施。因此,空中交通管制的安全隐患分级评估是民航双重预防工作机制实现的重要内容,同时也是实现零隐患的重要治理步骤。

在当前的隐患排查研究中,隐患分级评估方法已广泛应用于多个领域,如施工隐患排查^[1]、水利风险管控^[2]、电网隐患排查^[3]等,并取得了良好的效果。然而,在空中交通管制领域,对于管制隐患分级评估的研究相对较少。通过分析相关研究,发现空中交通管制隐患排查中的隐患分级过程通常面临以下问题,即评价指标过多、专家评估的主观性、量化评估不足。基于云模型的评估方法可以有效解决这些问题^[4],云模型可以通过量化评价指标、处理不确定性、减少专家评估主观性,能够有效地对隐患进行风险评估和分级。因此,本文通过构建云模型,对空中交通管制中的管制隐患进行隐患分级评估,从而为

空中交通管制的安全管理提供科学依据。

民航业法规政策方面,国际民航组织及中国民航局也发布相关管理公告逐步细化空中交通管理安全评估过程,使其能够应对复杂的现实环境。2011年中国民用航空局空管行业管理办公室发布相关管理办法,将专家评估法列入隐患排查程序之中。民航华北局也于2013年新修订了《民航华北地区管理局安全生产隐患排查治理工作制度》,提出各生产单位要建立至少二层隐患问题清单,该文件提出了进一步细化隐患分级的必要性。2022年发布的《民航安全风险分级管控和隐患排查治理双重预防工作机制管理规定》对隐患、风险、危险源进行了界定,在隐患等级方面该文件将隐患分为一般隐患及重大隐患^[1]。

目前,隐患分级评估是隐患管控管理工作的核心^[2],正确评估隐患、量化隐患,可解决隐患排查治理工作一刀切等问题^[3],隐患分级评估粗略会导致岗位职责不能层层分解到各个岗位,不能形成隐患分级排查标准^[4],确定一套行之有效的分级模型成为一个值得研究的问题。

1 基本理论

1.1 云定义

“云模型”中的“云”是指某一定性的概念与其

收稿日期: 2024-10-15

基金项目: 四川省科技计划(23ZDYF0586);中国民用航空飞行学院博士创新能力提升计划项目(PHD2023-038);西藏科技计划项目(XZ202403ZY0014)

作者简介: 廖勇(1983—),男,四川资阳人,博士,教授,研究方向为空中交通管理;张丹(1999—),女,甘肃兰州人,硕士研究生,研究方向为空中交通管理。

概念定量之间可视转换,“云模型”中的数字特征使用期望值(E_x)、熵(E_n)、超熵(H)进行表示,将模糊性和随机性集成到一起,云模型的特性使其适用于空中交通管制的安全隐患定性概念的定量表示,能够进一步精细空中交通管制隐患分级标准,满足日益复杂的空中交通管制环境以及公众对民航安全性越来越高的要求。云模型方法通过建立云关系矩阵,描述评价等级指标之间的相互作用,以更准确地评估空中交通管制隐患等级。在云计算的使用过程中,“云”是指一个互联网上的虚拟资源库提供计算、储存、软件等服务,共享资源给用户。在云模型中,“云”被看作一个提供抽象计算的发生器,完善定性的安全评估方法关于不能量化的缺陷^[5-7]。

1.2 云的数字特征

模型的数字特征由期望值(E_x)、熵(E_n)和超熵(H)定量地表达定性的概念^[8],在空中交通管制隐患排查方面,考虑的指标有隐患发生的可能性和隐患后果的严重程度两方面,结合云模型对这两个指标之间的模糊性和不确定性,通过数字特征来定量地表达指标特点^[9]。

1.3 云发生器

云模型通过正向云变换和逆向云变换实现定性概念与定量关系的相互转换,通过这种转换计算抽象概念的确定度和绘制云图等,发生正向云变换步骤如下所示。

INPUT:期望(E_x)、熵(E_n)、超熵(H)以及云滴数(N)。

生成一个正态随机 $E_n' \sim N(E_n, H e^2)$ 、 $x \sim N(E_x, E_n')$ 计算确定度 μ :

$$\mu = \exp\left[-\frac{(x - E_x)^2}{2E_n'}\right] \quad (1)$$

确定坐标 (x_i, μ_i) , 此坐标在云图中代表一个云滴重复 N 次直到产生 N 个云滴构成云图。

逆向云变换步骤如下所示,将专家的主观评分转化为定量云图。

INPUT:定量数据 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。

$$E_x = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$$E_n = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - E_x| \quad (3)$$

$$H e = \sqrt{S^2 - E_n^2} \quad (4)$$

式中:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \quad (5)$$

通过上述步骤,获得云特征值 $C(E_x, E_n, H e)$ 。

在云模型理论中通过正向云发生器,生成正态随机数 x 服从于期望(E_x),标准差为 E_n' ,并计算确定度 μ 反映定性概念的确定程度^[10-11]。通过逆向云模型,根据取得的定量数据,逆推提取数据的期望(E_x)、熵(E_n)和超熵($H e$)三个云特征值反映定量数据的概念属性特征。

2 隐患评估等级数值阈值确定与隐患评价等级模型建立

隐患等级指标阈值的确定和隐患评价等级模型的建立是通过分析历史数据和专家判断,以量化评估隐患级别并制定相应管理措施的关键步骤。

2.1 建立评价等级和标准云

2.1.1 建立评价等级

航局发布的咨询通告《民航安全风险分级管控和隐患排查治理双重预防工作机制的管理规定》在隐患等级方面将隐患分为一般隐患及重大隐患,隐患等级过于粗略,会导致处理决策的轻重缓急模糊、资源分配不当及对隐患认知不足。因此,应在现有文件规定的基础上,对隐患等级进行进一步细分^[14-16]。在其他相关领域中,通常将行业隐患细分为 3 或 4 个级别,如在建筑安全方面,将隐患分为四级,分别为轻微隐患、一般隐患、重大隐患和特别重大隐患^[12];在消防安全方面,隐患一般分为三级,分别为一般火灾隐患、重大火灾隐患、特大火灾隐患^[13]。在民航领域,安全评估常借鉴建筑行业的理论与方法,如危害与可操作性研究(HAZOP)法和故障模式及影响分析(FMEA)法。这使得建筑行业的分级细分标准对民航安全评估具有参考价值。通过融合这些经验,可以提升民航安全管理的有效性与科学性。

云模型在隐患评估等级方面的优点包括灵活性和适应性,能综合考虑多种因素,并将模糊信息转化为可量化数据。通过建立云关系矩阵,云模型有效揭示各指标间的相互影响,提高评估的准确性与可靠性。此外,该方法能够处理复杂的非线性关系,为空中交通管制提供更全面的安全分析^[17-18]。用于云模型的隐患评价等级分值如表 1 所示,评价等级具体内容如下所示。

I 级隐患:该级别的隐患通常对安全和环境影响较小,发生概率极低,且即使发生也不会造成明显损害。

II 级隐患:这一等级的隐患具有一定的风险,但在合理管理和监控下,发生的可能性仍然较低,

潜在影响可控。

Ⅲ级隐患：此类隐患的重要性显著，可能导致较大损失或伤害，需引起高度重视，必须采取有效措施进行防范和整改。

Ⅳ级隐患：此等级隐患具备极高的风险，可能导致严重后果，必须立即采取措施予以消除。

表 1 隐患评价级别分值标准

隐患级别		分值
一般隐患	I 级隐患	[0,30)
	II 级隐患	[25,55)
重大隐患	III 级隐患	[50,75)
	IV 级隐患	[70,100]

2.1.2 建立评价等级标准云

使用云模型评估隐患等级的关键在于建立评价等级标准云图，以直观表现空中交通管制隐患的评价等级。

$$\begin{cases} Ex_0 = \frac{Q_{\min} + Q_{\max}}{2} \\ He_0 = b \\ En_0 = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{6} \end{cases} \quad (6)$$

式中： Q_{\min} 、 Q_{\max} 分别为评价等级上下限； b 为常数，代表超熵标准值。

参考表 2 的分值上、下限，使用式(5)计算各空中交通管制隐患评价等级的云特征值，具体语言表达及云特征值如表 2 所示。

表 2 隐患评价等级数字特征

评价等级	Ex	En	He
I 级隐患	15	5	0.1
II 级隐患	40	5	0.1
III 级隐患	62.5	4.17	0.1
IV 级隐患	85	5	0.1

根据正向云发生器原理，导入表 2 数字特征运用 MATLAB 软件绘制空中交通管制关键隐患评价等级标准云，如图 1 所示。

2.2 组织专家进行评价

2.2.1 组织评价专家

在空管安全管理中，隐患分级评估面临诸多挑战，如复杂的影响因素、数据收集困难及缺乏历史参考，这使得专家群决策成为重要方法。首先，单一专家判断可能导致结果缺乏信度，因此整合多位专家见解可增强评估可靠性。其次，专家评估实施成本低且易操作，有效克服数据采集问题。此外，专家凭借丰富经验能够对未来安全形势进行前瞻

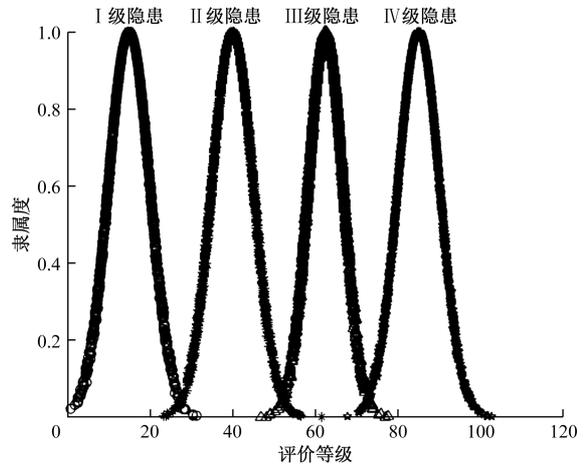


图 1 隐患评价等级标准云图

性判断，这是数据驱动方法无法比拟的。最后，专家不仅能划分安全隐患评价等级，还能提出具体的隐患管控措施，为安全管理提供切实可行的策略，从而提升整体安全水平。

2.2.2 专家评分

在选择安全管理专家的专家时，依据专业知识和经验进行筛选，通常建议选择 5~10 名专家，以确保评分的客观性和可靠性。邀请专家参与评分会议，共同探讨隐患特征，深入了解隐患性质及潜在后果。在独立填写评分问卷时，采用匿名方式收集评分，以提高客观性和诚信度。评分完成后，及时汇总结果，整理成数据表，为后续分析和安全管理措施制定奠定基础。定期组织专家评审会议，以更新评分集合，确保评估过程的持续有效性。在评审过程中，鼓励专家提出具体决策意见，如加强监控、提升培训频率或优化应急预案，这些建议有助于整体安全水平提升。通过专家协作与深入讨论，隐患分级评估能够更全面、科学地指导未来的安全管理工作。

当有 m 个专家对 n 个隐患评估时，将第 i 个专家的评分表示为矩阵的行向量， m 个专家评估完成后得到的隐患评估矩阵：

$$x_Y = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.3 确定评价结果

2.3.1 计算评价综合云

将收集到的专家评分数据进行处理时，首先需要使用逆向云发生器来提取相关的云特征值，包括

期望值、熵和超熵。

计算专家评分期望值,用于反映专家评分的中心趋势,表示对隐患状态的总体评估, m 个专家评估完成后得到的期望矩阵为

$$\mathbf{E}x_Y = [E_{x_1}, E_{x_2}, \dots, E_{x_n}] = \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{m1}, \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{m2}, \dots, \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{mm} \right] \quad (8)$$

计算熵,熵表示专家评分的不确定性,反映不同专家之间意见的一致性程度。熵值越小,说明专家意见越集中,反之则表明存在较大分歧, m 个专家评估完成后得到的熵矩阵如式(9)所示。

$$\mathbf{E}n_Y = [E_{n_1}, E_{n_2}, \dots, E_{n_n}] = \left[\sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |x_{m1} - E_{x_1}|, \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |x_{m2} - E_{x_2}|, \dots, \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |x_{mm} - E_{x_n}| \right] \quad (9)$$

计算超熵,超熵进一步描述了熵的变化情况,有助于理解评分结果的稳定性和变动范围,计算过程为

$$S_Y^2 = \frac{1}{5-1} \sum_{i=1}^m (x_{Yi} - E_{x_Y})^2$$

$$He_Y = \sqrt{S^2 - E_n^2} = \sqrt{\frac{1}{5-1} \sum_{i=1}^m (x_{Yi} - E_{x_Y})^2 - E_n^2} \quad (10)$$

获得这三项云特征值后,接下来将其输入至正向云发生器中。在此阶段,计算隶属度 μ_Y ,隶属度与专家评分矩阵一同构成云滴的坐标值 (x_i, μ_Y) ,将生成的云滴与预先设定的评价等级标准云图进行合并。该标准云图通常基于历史数据或行业标准,提供不同隐患评价等级的清晰界定。通过云滴

与标准云图的结合,可以形成针对该隐患的综合评价等级云。

2.3.2 确定评价等级

通过正向云模型生成的云图,直观反映现实空中交通管制单位某一时期的隐患状态与标准云图之间的贴合关系^[20]。为了提高精确程度,应用龚燕冰等^[21]提出的正态云相似度计算得到合适隐患评价等级评价,计算流程如下。

假设现在要比较某一项隐患评价云与某个评价等级标准云,这两个云分别表示为 N_1 和 N_2 ,即 $N_1 = (E_{x_1}, E_{n_1}, He_1)$, $N_2 = (E_{x_2}, E_{n_2}, He_2)$,这两个评价等级标准云的相似度为 $C(N_1, N_2)$,计算方法如下。

$$C(N_1, N_2) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2\varepsilon} - \varepsilon \quad (11)$$

式中:

$$\varepsilon = \int_{-\infty}^{\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (12)$$

$$\beta = \frac{|E_{x_2} - E_{x_1}|}{\sqrt{E_{n_1}^2 + He_1^2} + \sqrt{E_{n_2}^2 + He_2^2}} \quad (13)$$

在实际应用中,通过比较对比某一项隐患评价云和两个评价等级标准云的贴合度,来确认某一隐患具体处在哪个评价等级范围内。

2.4 技术路线

隐患分级模型技术路线如图2所示。

3 案例分析

为了展现本模型在隐患评估方面的实用性,以某管制部门隐患排查中的隐患评估为案例,评估该管制部门的管制区域空管运行的隐患评价等级和安全情况,根据评估结果针对性地提出一系列的风险缓解和防控措施,提高该管制区域内空管运行的安全水平^[22-23]。

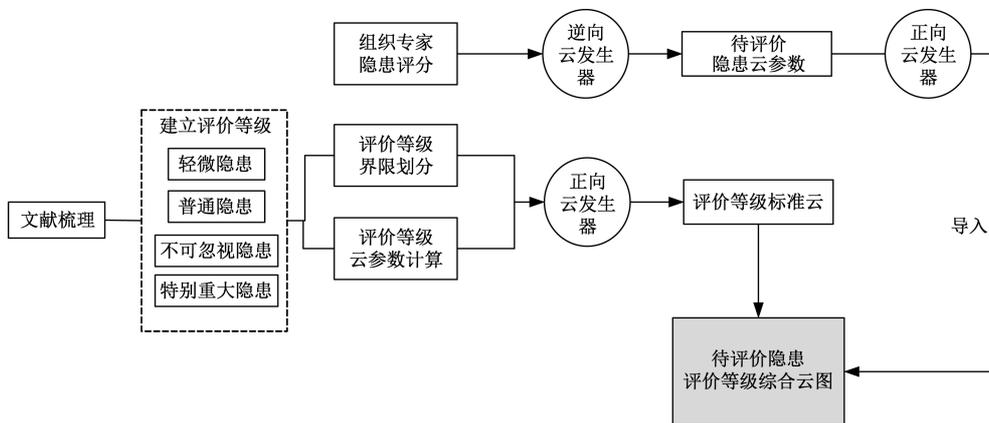


图2 隐患分级模型技术路线

3.1 建立评价等级和标准云

在案例分析中,评价等级和标准云图的建立参考前文的具体数值和标准。隐患评价等级在一般隐患基础上细分为 I 级和 II 级隐患;对于重大隐患,则进一步细分为 III 级和 IV 级隐患,应用此隐患评估体系。

3.2 组织专家进行评价

为论证云模型在隐患评价等级评估中的适用性,组织了 6 位专家($E_1 \sim E_6$),他们具备丰富的空中交通管制经验。制定评分标准后,评分会议主持人简述隐患内容及特性,专家们共同分析隐患特征,深入探讨其性质及潜在影响,以确保充分理解。随后,每位专家独立根据评分标准进行打分。采用在线问卷工具收集评分,确保保密性和统计便捷性。评分完成后,汇总结果,为后续工作提供决策依据。

3.3 确定评价结果

3.3.1 计算评价综合云

针对该管制部门,随机选择 6 个隐患,分别命名为 H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 、 H_5 和 H_6 。为了评估这些隐患的风险程度,6 位专家对各个隐患进行了评分,并将结果整理成表 3。表 3 中 $E_1 \sim E_6$ 对应列表代表每位专家针对不同隐患的评分,表 3 后三列则记录了专家评分的云特征值。

基于表 3 中云特征值,利用 MATLAB 软件分别绘制各个空管关键隐患云图,并同隐患评价等级标准云图进行对比,直观观察各个空管关键隐患云图的位置和形状,以 H_1 隐患和 H_2 隐患为例,根据图 3 可知,空管人员执照过期的云滴集中在 I 级隐患附近,偏向于 I 级隐患,故判定其隐患评价等级为 I 级隐患;根据图 4 可知,跑道道面条件差的云滴集中在 I 级隐患云图上,故判定其隐患评价等级为 I 级隐患。

3.3.2 确定评价等级

如某一隐患评价云处于两个评价等级之间,通

过直接观察的方法存在误差,使用前文提到的式(11)进行进一步的计算,以空管人员执照过期隐患为例,其评价云处于 I 级隐患和 II 级隐患这两个评价等级评价云之间,空管人员执照过期这隐患评价云云特征值为 $N_1(7.33, 1.67, 0.57)$, I 级隐患评价等级评价云云特征值为 $N_2(15, 5, 0.1)$, II 级隐患的评价等级综合云特征值为 $N_3(40, 5, 0.1)$,其具体计算过程如下。

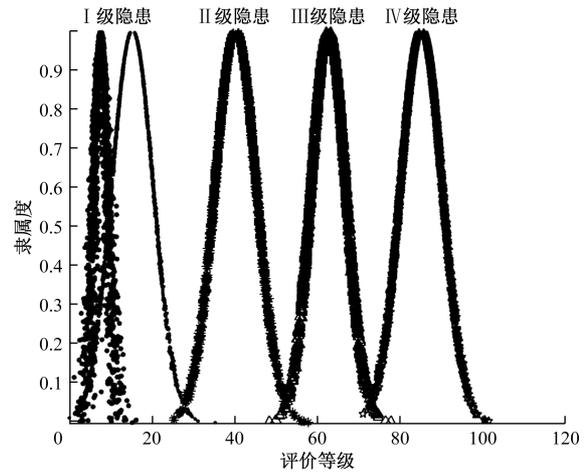


图 3 空管人员执照过期综合云图

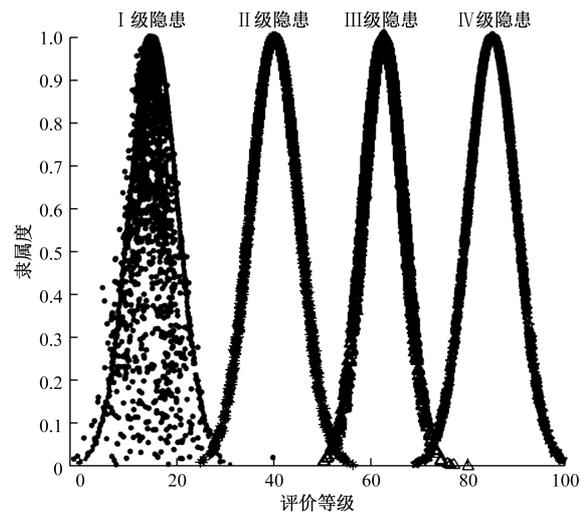


图 4 跑道道面条件差综合云图

表 3 专家评分数值汇总

空中交通管理关键隐患	专家评分						评分云特征值		
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_x	E_n	E_h
空管人员执照过期(H_1)	10	8	8	6	5	7	7.33	1.67	0.57
跑道道面条件差(H_2)	12	14	14	12	14	20	14.33	2.37	1.75
机场保障人员数量不足(H_3)	32	28	16	4	8	8	16.00	11.70	1.58
无线电通信干扰导致塔台工作异常(H_4)	10	10	8	7	8	10	8.83	1.46	0.61
乘客在机坪内未遵照指引(H_5)	8	6	6	10	5	7	7.00	1.67	0.64
进近灯光存在缺陷(H_6)	14	20	10	8	20	16	14.67	5.01	0.18

$$\beta_1 = \frac{|Ex_2 - Ex_1|}{\sqrt{En_1^2 + He_1^2} + \sqrt{En_2^2 + He_2^2}} = \frac{|15 - 7.33|}{\sqrt{1.67^2 + 0.57^2} + \sqrt{1.67^2 + 0.1^2}} \quad (14)$$

$$\epsilon_1 = \int_{-\infty}^{\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \approx 0.871 535 \quad (15)$$

$$C(N_1, N_2) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2\epsilon} - \epsilon \approx 0.202 165 425 1 \quad (16)$$

同理可得, $C(N_1, N_3) \approx 1.500 000 5 \times 10^{-6}$, 由于 $C(N_1, N_2) > C(N_1, N_3)$, 所以证明空管人员执照过期隐患评价云对于 I 级隐患的相似度高, 说明对于本区域的日常工作内容而言, 空管人员执照过期这项隐患处于 I 级隐患的状态。

4 结论

综上所述, 隐患治理需采用分级措施, 以实现零容忍目标。通过持续监控与评估, 确保每个环节有效治理隐患, 维护空中交通管制安全。模型建立过程中, 明确以管制隐患为研究对象, 并确定待评估内容。收集多位专家的主观评价, 形成初步数据基础。随后, 对数据进行处理, 以便后续分析。专家数据导入云模型, 将隐患细分为多个等级。最后, 对模型进行验证与调整, 确保准确性和实用性。此外, 当两个隐患处于同一评价等级时, 该模型能通过隐患评价云评估其对更高严重等级的拟合程度, 从而促进评级的细化。这种精确的分级评估为隐患治理提供了重要依据, 使管理人员在实际操作中能够做出更加科学的决策。因此, 采用该分级模型不仅提高了隐患评估的准确性, 也为民航安全管理奠定基础。

参考文献

- [1] 倪金源. 现场施工安全风险分级管控及隐患排查治理体系的构建[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(23): 61-63.
- [2] 黄学超, 张鑫, 王冬雪. 水利工程运行安全风险分级管控体系建设的探索与实践[J]. 治淮, 2022(1): 46-48.
- [3] 姜媛媛, 张振振, 薛生, 等. 改进组合赋权法的配电网隐患评估[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(22): 9030-9035.
- [4] 程磊, 程志楷, 蒋方, 等. 云模型在区域灾害风险评估中的应用研究[J]. 科技促进发展, 2022, 18(2): 180-187.
- [5] 曹杨. 我国海洋石油事故隐患分类与分级研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(S1): 42-47.
- [6] 辜智慧, 李佳云, 邓蓓瑶, 等. 基于分类分级管控的绿道综合安全风险评估体系建构[J]. 城市规划学刊, 2020(2): 49-55.
- [7] 罗帆, 贾贵娟, 陈高明, 等. 空管安全风险评价指标体系的优化设计[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(8): 115-120.
- [8] 陈全, 刘家祥. 基于 FMEA-Fuzzy 制定煤矿设备隐患分级排查标准[J]. 煤矿机械, 2018, 39(12): 141-143.
- [9] 邢观华. 基于二维云模型和 ALARP 准则的风险评价法[J]. 特种结构, 2024, 41(4): 94-100.
- [10] 杨朝晖, 李德毅. 二维云模型及其在预测中的应用[J]. 计算机学报, 1998(11): 961-969.
- [11] 黄琼桃. 云模型相似性度量方法研究及应用[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- [12] 支慧, 董倩. 基于云模型的省域流通产业竞争力评价模型构建及实证研究[J]. 商业经济研究, 2024(17): 172-175.
- [13] 张豫翔, 王肖戎, 吴明功, 等. 基于模糊层次分析法和云模型的非常规情况下空管运行风险评估[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(4): 42-47.
- [14] 翁兴卓, 王海青, 薛勇, 等. 基于组合赋权法-云模型的装备保障能力评估研究[J]. 装备制造技术, 2022(8): 97-100.
- [15] 屈扬, 张学博. 基于组合赋权云模型的煤矿作业场所职业危害综合评价[J]. 煤炭工程, 2021, 53(10): 153-159.
- [16] 赵忠义. 建筑工程项目十大安全隐患及预防措施[J]. 煤炭工程, 2016, 48(3): 142-144.
- [17] 高伦, 左晨. 建筑工程消防隐患及改造设计探究[J]. 工程抗震与加固改造, 2023, 45(3): 180.
- [18] 辜智慧, 李佳云, 邓蓓瑶, 等. 基于分类分级管控的绿道综合安全风险评估体系建构[J]. 城市规划学刊, 2020(2): 49-55.
- [19] 黄宇欣. 基于风险事故隐患分级模型研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- [20] 廖盛美, 张清海, 陶光灿, 等. 基于风险分级技术的中国肉制品质量安全演化规律研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(17): 232-240.
- [21] 姚萱, 杨红刚, 陈必群, 等. 基于博弈论组合赋权-云模型的河流型水源地环境风险评估研究[J/OL]. 环境科学学报, 1-13[2024-09-30]. <https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2024.0376>.
- [22] 刘博诗, 邱钰峻, 祝志飞, 等. 基于云模型和改进证据理论的铁路新线引入枢纽优选评价研究[J/OL]. 铁道标准设计, 1-11[2024-09-30]. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202402060006>.
- [23] 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.
- [24] 唐家文, 董兵, 王超峰. 基于云模型的空管安全运行保障能力评价[J]. 航空工程进展, 2021, 12(4): 59-67.
- [25] 龚艳冰, 蒋亚东, 梁雪春. 基于模糊贴近度的正态云模型相似度度量[J]. 系统工程, 2015, 33(9): 133-137.
- [26] 王洁宁, 孙晓萌. 基于 STPA 空管运行系统安全分析方法研究[J]. 武汉理工大学学报, 2017, 39(12): 49-55.
- [27] 左保龙, 张久星, 徐浩军. 人机环境工程的空管安全性模糊综合评判[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(2): 60-64.

Safety Hidden Danger Classification Assessment Model for Air Traffic Control Based on Cloud Model

LIAO Yong, ZHANG Dan

(College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, Sichuan, China)

Abstract: Hidden danger investigation is a crucial method for ensuring the safety of air traffic control, and the graded assessment of hidden dangers serves as an important basis for their management. Focusing on the hidden dangers associated with air traffic control, a grading model was established based on cloud theory grounded in expert evaluations. In response to the relatively coarse categorization provided by existing regulations regarding hidden dangers, a more precise evaluation framework was developed to enhance the accuracy of assessments. To improve the reliability of these evaluations, a group decision-making approach involving experts was employed for assessing hidden danger levels. Furthermore, to enhance the objectivity of the evaluation process, a cloud model was introduced for quantitative assessment alongside qualitative analyses. Finally, an illustrative example was presented to demonstrate the evaluation procedure. The research findings indicate that the cloud model-based approach exhibits strong feasibility and applicability.

Keywords: cloud model; grading of hidden dangers; risk assessment; air traffic control