

文章编号:1674-8190(2021)04-059-09

# 基于云模型的空管安全运行保障能力评价

唐家文<sup>1</sup>,董兵<sup>1</sup>,王超峰<sup>2</sup>

(1.中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院,广汉 618307)

(2.中国民用航空飞行学院 机场工程与运输管理学院,广汉 618307)

**摘要:**空管安全运行保障能力对空管安全运营具有非常重要的影响。考虑影响空管安全运行保障能力的各种因素的模糊性和随机性,引入云模型理论对空管安全运行保障能力实现定量评价;基于空管安全运行管理的特点,构建空管安全运行保障能力的评价指标体系,应用排队理论对评价指标进行权重赋值,以克服主观因素对权重赋值的影响;通过逆向云发生器计算空管安全运行保障能力评价指标的云数字特征,得到安全运行保障能力的评价云。通过实例应用进行验证,结果表明:云模型能够对空管安全运行保障能力进行整体准确评价,并能找出影响保障能力的主要环节,有助于空管部门采取针对性措施提高保障能力。

**关键词:**空中交通管理;安全运行保障能力;评价指标体系;云模型;云发生器

中图分类号:V355.1; [X949]

文献标识码:A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.04.07

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Evaluation on Safe Operation Support Ability of Air Traffic Management Based on Cloud Model

TANG Jiawen<sup>1</sup>, DONG Bing<sup>1</sup>, WANG Chaofeng<sup>2</sup>

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

(2. College of Airport Engineering and Transportation Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

**Abstract:** The safe operation support ability of air traffic management is of important influence on the air traffic safe operation. Considering the fuzziness and randomness of various factors that affect the safe operation support ability of air traffic management, the cloud model theory is introduced to realize the quantitative evaluation of the safe operation ability of air traffic management. Based on the characteristics of safe operation of air traffic management, the evaluation indices system for safe operation support ability is constructed. Queuing theory is used to assign weights to the evaluation indicators to overcome the subjective influence on the weight assignment. By calculating the cloud digital characteristics of the evaluation indices of the safe operation support ability of air traffic management through the reverse cloud generator, the evaluation cloud of the safe operation support ability is obtained. Case studies show that the cloud model enables overall and accurate evaluation of safe operation support ability of air traffic management, and find out the key indicators affecting the safe operation support ability, which helps the air traffic management department to take measures to improve the safe operation support ability of air traffic management.

**Key words:** air traffic management; safe operation support ability; evaluation index system; cloud model; cloud generator

收稿日期:2020-11-08; 修回日期:2021-03-27

基金项目:国家自然科学基金(U1233105); 中国民航飞行学院科研基金(J2018-22, Q2015-074)

通信作者:唐家文, tangjiawencafuc@163.com

引用格式: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.

TANG Jiawen, DONG Bing, WANG Chaofeng. Evaluation on safe operation support ability of air traffic management based on cloud model[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(4): 59-67. (in Chinese)

## 0 引言

空中交通管理(Air Traffic management),简称空管,其核心任务是保障空中交通安全、维护空中交通秩序、促进空中交通顺畅。随着民航运输的高速发展,愈益彰显出空管安全运行保障能力存在的瓶颈问题<sup>[1]</sup>。相关研究表明,空管监控不当不力是造成航空器空中相撞的主要原因,比例达到74.3%<sup>[2]</sup>。因此,研究空管安全运行保障能力的综合评价问题,对正确认识空管安全运行保障能力现状,发现影响空管安全运行保障能力的主要因素,制定空管安全运行保障能力的整改措施,提高空管系统安全管理水平等具有显著的理论价值和现实指导意义。

对于空管安全保障的探索,国内外主要从三个方面开展了研究。第一方面主要是对空管安全运行保障中的风险问题开展研究<sup>[3-8]</sup>,在对空管安全危险源识别的基础上开展了安全风险评价研究,提出了降低安全风险的措施;第二方面主要基于国际民航组织(ICAO)所倡导的民航安全管理体系建设问题,研究了如何在空管系统中开展安全管理体系建设等方面的问题<sup>[9-11]</sup>;第三方面针对保障空管安全运行的一些基本要素开展了相关研究,主要涉及空管系统安全信息、设备保障、组织支持、安全文化、安全绩效等内容<sup>[12-17]</sup>。

针对空管安全运行保障能力进行整体评价的研究还较为缺乏,鉴于空管安全运行保障能力整个系统的复杂性,以及影响空管安全运行保障能力的各因素所具有的模糊性和随机性,模糊综合评价法等传统方法对空管安全运行保障能力难以得到有效评价结果。云模型是在模糊理论与概率理论上发展起来的,通过引入熵和超熵的概念解决了定性问题转换为定量问题过程中存在的模糊性和随机性问题<sup>[18]</sup>。

本文提出基于云模型的空管安全运行保障能力评价模型,在系统分析空管安全运行保障的需求和特点的基础上,构建空管安全运行保障能力评价指标体系,运用排队理论计算评价指标的权重,通过对评价数据进行逆向云发生器处理得到因素层的评价云,经过云代数运算分别得到准则层和目标层的综合云,对综合云与基准云进行正向云发生器处理后,根据图形对比,得到空管安全运行保障能力的等级。

## 1 空管安全运行保障能力评价指标体系构建

### 1.1 空管安全运行保障能力评价指标

空管安全运行保障能力是指在空中交通安全运行过程中,通过安全风险、安全文化管理、专业技术能力、安全保障投入、组织管理程序以及设备运行能力等安全管理组织程序和生产要素的集成,保障空中交通管理能够在可接受的安全期望(或者安全水平)下,空管单位安全正常运行的能力。目前关于空管安全运行保障能力尚未形成一套确定的评价指标体系,难以对空管安全运行保障能力开展全面性研究。

空管安全运行保障能力评价指标体系的构建必须遵循系统性、科学性、全面性、可比性和可行性等原则<sup>[12]</sup>,评价指标的选取不仅要充分反映保障空管安全运行管理的内容,还应结合中国民航局已经实施的《空管安全审计》<sup>[19]</sup>和《空中交通服务安全评估系统》<sup>[20]</sup>等管制规定,同时在广泛征求空管安全专家建议的基础上,构建空管安全运行保障能力评价指标,如表1所示,该评价指标是由6个准则层指标和26个指标层指标构建组成的递阶层次结构。

表1 空管安全保障能力指标

Table 1 Air traffic management safe support ability index

| 准则层              | 指标层              | 指标层的含义                |
|------------------|------------------|-----------------------|
| 安全风险<br>管理 $B_1$ | 识别风险能力 $C_{11}$  | 反映空管单位对安全风险的识别能力      |
|                  | 评估风险能力 $C_{12}$  | 反映空管单位对安全风险的评估能力      |
|                  | 控制风险能力 $C_{13}$  | 反映空管单位对安全风险的<br>控制能力  |
|                  | 应急处置能力 $C_{14}$  | 反映空管单位对突发风险的<br>处置能力  |
| 安全文化<br>管理 $B_2$ | 安全责任意识 $C_{21}$  | 反映空管单位安全风险的<br>责任意识   |
|                  | 安全制度规范性 $C_{22}$ | 反映空管单位安全制度建<br>设的规范性  |
|                  | 安全价值观建设 $C_{23}$ | 反映空管单位安全风险的<br>重视程度   |
|                  | 安全期望水平 $C_{24}$  | 反映空管单位对安全风险的<br>期望水平值 |
|                  | 安全奖惩措施 $C_{25}$  | 反映空管单位对安全运行<br>的激励与惩罚 |

续表

| 准则层          | 指标层              | 指标层的含义            |
|--------------|------------------|-------------------|
| 专业技术能力 $B_3$ | 专业知识技能 $C_{31}$  | 衡量空管单位员工专业知识和专业技能 |
|              | 身心健康水平 $C_{32}$  | 反映空管单位员工的身体和心理素质  |
|              | 应变决策能力 $C_{33}$  | 反映空管单位员工的应急决策响应能力 |
|              | 协同配合能力 $C_{34}$  | 反映空管单位各部门协同配合能力   |
| 安全保障投入 $B_4$ | 安全绩效投入 $C_{41}$  | 为保障空管安全绩效而产生投入    |
|              | 基础设施投入 $C_{42}$  | 为保障空管安全的基础设施投入    |
|              | 技能培训投入 $C_{43}$  | 为保障空管安全的技能培训投入    |
|              | 宣传教育投入 $C_{44}$  | 为保障空管安全的宣传教育投入    |
|              | 保障资金投入 $C_{45}$  | 为保障空管安全的保障资金投入    |
| 组织管理程序 $B_5$ | 组织结构合理性 $C_{51}$ | 衡量空管单位组织机构健全合理程度  |
|              | 组织交流有效性 $C_{52}$ | 衡量空管单位组织交流程序的有效性  |
|              | 班组资源管理 $C_{53}$  | 衡量空管班组资源组织管理的有效性  |
|              | 团队合作精神 $C_{54}$  | 为保障空管安全团队协同合作程度   |
| 设备运行能力 $B_6$ | 设备维护能力 $C_{61}$  | 反映空管设备维护护理的能力     |
|              | 设备运行正常率 $C_{62}$ | 描述空管设备正常运行的情况     |
|              | 设备质量完好性 $C_{63}$ | 描述空管设备性能质量状况      |
|              | 设备更新情况 $C_{64}$  | 衡量空管设备更新的时效性      |

### 1.2 确定评价指标权重

对指标进行准确的权重赋值是开展空管安全运行保障能力评价的前提。传统的权重取值方法主要有主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法是在综合了评价专家的知识、经验与偏好等基础上给出权重值;客观赋权法主要依据评价指标的原始数据,通过数学模型计算得到指标的权重值。主观赋权法具有运算简单的优点,但是容易受到专家主观性影响;客观赋权法容易受到原始数据的干扰,可能会出现与实际不符的情况,这些都会对指标权重确定的准确性带来影响。为确保

评价指标权重获取的公正性与合理性,能够良好体现主观性与客观性,指标权重的求解可采用<sup>[21-22]</sup>

$$\omega'_i = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{-2\ln\left[\frac{2(i-1)}{n}\right]}}{6} & \left(1 < i \leq \frac{n+1}{2}\right) \\ \frac{1}{2} - \frac{\sqrt{-2\ln\left[2 - \frac{2(i-1)}{n}\right]}}{6} & \left(\frac{n+1}{2} < i \leq n\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $n$ 为评价指标数量; $i$ 为参与评价的指标排队等级,是根据评价指标的重要程度对指标进行排序,当评价指标处于相同的等级时, $i$ 的取值相同,但是当 $i=1$ 时, $\omega'_i=1$ 。

采用专家咨询,对评价指标进行等级排序,根据公式(1)得到评价指标的绝对权重 $\omega'_i$ ,通过对 $\omega'_i$ 归一化计算得到评价指标的相对权重值 $\omega_i$ 。

## 2 空管安全运行保障能力云模型

### 2.1 云模型理论

20世纪90年代李德毅院士提出了云模型,其主要思想为:假定 $U$ 为一个可精确度量的定量论域, $C$ 为 $U$ 上的定性概念。当定量值 $x$ 属于 $U$ 中某一值时,同时也属于 $C$ 中的一个随机数, $x$ 在 $C$ 中的确定度为 $\mu(x) \in [0, 1]$ ,并且 $\mu(x)$ 的分布满足:

$$\mu : U \rightarrow [0, 1], \forall x \in U \text{ 有 } x \rightarrow \mu(x) \quad (2)$$

则每一个 $x$ 对应一个云滴, $x$ 在该论域 $U$ 上的分布称为云<sup>[15]</sup>。

通常 $(E_x, E_n, H_e)$ 三个参数被用于表示云模型的特性,其中 $E_x$ 表示云滴在论域区间的期望值,反映云滴在论域空间的位置;熵 $E_n$ 表示云滴的取值范围,用于综合度量定性概念的模糊性;超熵 $H_e$ 反映熵的不确定性,表示云的厚度,是对论域空间随机性的度量。

云模型中通过采用云发生器在定性语言和定量数值之间进行不确定性的转换,云发生器有正向和逆向两种。其中,正向高斯云算法被广泛应用,实现步骤为:

- (1) 生成一个以 $E_n$ 为期望值, $H_e^2$ 为方差的高斯随机数 $E'_m = NORM(E_n, H_e^2)$ ;
- (2) 生成一个以 $E_x$ 为期望值, $E_{mx}^2$ 为方差的高

斯随机数  $x_i = NORM(E_x, E_{n_i}^2)$ ;

(3) 计算云滴的隶属度,其确定度值为

$$\mu_i = e^{-\frac{(x_i - E_x)^2}{2E_{n_i}^2}} \quad (3)$$

(4) 将  $x_i$  作为确定度  $\mu_i$  在数域中生成的云滴;

(5) 重复以上步骤,直到  $N$  个云滴生成为止。

## 2.2 确定评语集和基准云

基于空管安全运行保障能力的运行特性,征询空管安全专家建议,将空管安全运行保障能力分为五个等级,分别对应保障能力极低、较低、一般、较高、极高,各等级的具体分值区间如表 2 所示。

表 2 空管安全运行保障能力标准量化值  
Table 2 Standard quantization value of safe operation support ability

| 量化值   | 评价语言 | 量化值      | 评价语言 |
|-------|------|----------|------|
| [0,3] | 极低   | [7,8.5]  | 较高   |
| [3,6] | 较低   | [8.5,10] | 极高   |
| [6,7] | 一般   |          |      |

根据表 2 中的空管安全运行保障能力等级,结合云模型理论,可得到空管安全运行保障能力评价的基准云模型,其云数字特征通过式(4)~式(6)计算得到。

$$E_{x_s} = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2} \quad (4)$$

$$E_{n_s} = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{6} \quad (5)$$

$$H_{e_s} = l \quad (6)$$

式中: $x_{\max}$  和  $x_{\min}$  分别为保障能力等级分值区间的上下限; $l$  为常数,可根据评价指标的模糊阔度进行取值,且不宜取值过大,本文取  $l = 0.05^{[18]}$ 。

由式(4)~式(6)计算基准云的数字特征,如表 3 所示。应用正向云发生器算法通过 Matlab 得到基准云云图,如图 1 所示。

表 3 基准云数字特征

Table 3 Digital characteristics of benchmark cloud

| 保障能力 | $E_{x_s}$ | $E_{n_s}$ | $H_{e_s}$ |
|------|-----------|-----------|-----------|
| 极低   | 1.500 0   | 0.500 0   | 0.050 0   |
| 较低   | 4.500 0   | 0.500 0   | 0.050 0   |
| 一般   | 6.500 0   | 0.166 7   | 0.050 0   |
| 较高   | 7.750 0   | 0.250 0   | 0.050 0   |
| 极高   | 9.250 0   | 0.250 0   | 0.050 0   |

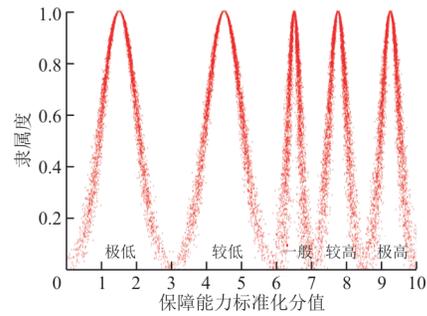


图 1 基准云云图

Fig. 1 Benchmark cloud diagram

## 2.3 确定指标层各个评价指标的评价云

评价专家根据表 2 中的标准,基于中国民航局已经实施的《空管安全审计》<sup>[19]</sup>和《空中交通服务安全评估系统》<sup>[20]</sup>等管制规定,对空管安全运行保障能力每个评价指标进行具体打分,得到每个评价指标的得分数据  $x_i$ ,通过逆向云发生器对数据进行处理,得到每个评价指标的安全保障能力评价云  $A_{e_j}$ ,其数字特征为

$$E_{x_c} = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

$$E_{n_c} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - E_{x_c}| \quad (8)$$

$$H_{e_c} = \sqrt{S^2 - E_{n_c}^2} \quad (9)$$

式中: $S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - E_{x_c})^2$ ,为专家数据方差。

## 2.4 计算综合云

将评价指标的评价云与对应的权重进行模糊合成,分别得到准则层和目标层的综合云。以准则层的综合云  $A_b$  为例,其数字特征为

$$E_{x_b} = \sum_{j=1}^m \omega_j E_{x_{e_j}} \quad (10)$$

$$E_{n_b} = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j E_{n_{e_j}}^2} \quad (11)$$

$$H_{e_b} = \sum_{j=1}^m \omega_j H_{e_{e_j}} \quad (12)$$

式中: $A_{e_j}(E_{x_{e_j}}, E_{n_{e_j}}, H_{e_{e_j}})$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ) 为评价指标  $C_j$  的评价云; $\omega_j$  为其对应的权重值。

## 2.5 计算结果评价

根据计算可得空管安全运行保障能力的综合评价云、熵及超熵,通过与标准云进行对比分析,能够对空管安全运行保障能力现状进行判断与评价,从而确定空管安全运行保障能力的评价等级。

## 3 实证分析

基于所构建的空管安全运行保障能力评价指标,邀请 10 位空管领域的安全运行管理专家进行

专家评分,运用云模型理论对西南某空管分局的空管安全运行保障能力进行实证评价。

### 3.1 确定评价指标权重

对空管安全管理专家进行反复征询,按照重要程度对评价指标排序,根据式(1)得到准则层和指标层的指标权重,计算结果如表4~表5所示。

表4 准则层指标权重

Table 4 Index weights at the criterion level

| 指标    | 等级 | $\omega'_i$ | $\omega_i$ |
|-------|----|-------------|------------|
| $B_1$ | 1  | 1.000 0     | 0.194 4    |
| $B_2$ | 2  | 0.747 1     | 0.145 2    |
| $B_3$ | 1  | 1.000 0     | 0.194 4    |
| $B_4$ | 3  | 0.650 1     | 0.126 4    |
| $B_5$ | 2  | 0.747 1     | 0.145 2    |
| $B_6$ | 1  | 1.000 0     | 0.194 4    |

表5 指标层  $C_{ij}$  指标权重

Table 5  $C_{ij}$  index weight of the index layer

| 指标       | 等级 | $\omega'_i$ | $\omega_i$ |
|----------|----|-------------|------------|
| $C_{11}$ | 1  | 1.000 0     | 0.312 9    |
| $C_{12}$ | 3  | 0.500 0     | 0.156 4    |
| $C_{13}$ | 2  | 0.696 2     | 0.217 8    |
| $C_{14}$ | 1  | 1.000 0     | 0.312 9    |
| $C_{21}$ | 1  | 1.000 0     | 0.253 3    |
| $C_{22}$ | 1  | 1.000 0     | 0.253 3    |
| $C_{23}$ | 2  | 0.725 6     | 0.183 8    |
| $C_{24}$ | 3  | 0.611 3     | 0.154 8    |
| $C_{25}$ | 3  | 0.611 3     | 0.154 8    |
| $C_{31}$ | 1  | 1.000 0     | 0.294 8    |
| $C_{32}$ | 2  | 0.696 2     | 0.205 2    |
| $C_{33}$ | 1  | 1.000 0     | 0.294 8    |
| $C_{34}$ | 2  | 0.696 2     | 0.205 2    |
| $C_{41}$ | 3  | 0.611 3     | 0.164 1    |
| $C_{42}$ | 1  | 1.000 0     | 0.268 4    |
| $C_{43}$ | 2  | 0.725 6     | 0.194 8    |
| $C_{44}$ | 4  | 0.388 7     | 0.104 3    |
| $C_{45}$ | 1  | 1.000 0     | 0.268 4    |
| $C_{51}$ | 1  | 1.000 0     | 0.312 9    |
| $C_{52}$ | 1  | 1.000 0     | 0.312 9    |
| $C_{53}$ | 2  | 0.696 2     | 0.217 8    |
| $C_{54}$ | 3  | 0.500 0     | 0.156 4    |
| $C_{61}$ | 1  | 1.000 0     | 0.294 8    |
| $C_{62}$ | 1  | 1.000 0     | 0.294 8    |
| $C_{63}$ | 2  | 0.696 2     | 0.205 2    |
| $C_{64}$ | 2  | 0.696 2     | 0.205 2    |

### 3.2 二级指标评价云

按照空管安全运行保障能力标准,通过10位空管安全运行管理专家对评价指标进行专家评分,基于云模型中的逆向云发生器原理,根据式(7)~式(9)得到指标层评价指标的评价云。每个保障能力指标的数字特征和保障能力排序结果如表6所示。

表6 评价云

Table 6 Index evaluation cloud

| 指标       | $E_x$   | $E_n$   | $H_e$   | 排序 |
|----------|---------|---------|---------|----|
| $C_{11}$ | 8.820 0 | 0.325 9 | 0.115 6 | 11 |
| $C_{12}$ | 9.110 0 | 0.315 8 | 0.120 8 | 1  |
| $C_{13}$ | 8.860 0 | 0.275 7 | 0.046 9 | 10 |
| $C_{14}$ | 8.960 0 | 0.185 5 | 0.061 8 | 3  |
| $C_{21}$ | 8.050 0 | 0.413 6 | 0.085 3 | 23 |
| $C_{22}$ | 8.630 0 | 0.288 3 | 0.101 7 | 16 |
| $C_{23}$ | 8.110 0 | 0.366 0 | 0.084 1 | 21 |
| $C_{24}$ | 8.900 0 | 0.225 6 | 0.014 7 | 7  |
| $C_{25}$ | 8.880 0 | 0.135 4 | 0.035 1 | 8  |
| $C_{31}$ | 8.790 0 | 0.293 3 | 0.113 0 | 13 |
| $C_{32}$ | 8.920 0 | 0.250 7 | 0.110 8 | 5  |
| $C_{33}$ | 8.690 0 | 0.315 8 | 0.075 4 | 15 |
| $C_{34}$ | 8.910 0 | 0.162 9 | 0.033 5 | 6  |
| $C_{41}$ | 8.210 0 | 0.366 0 | 0.117 2 | 20 |
| $C_{42}$ | 8.110 0 | 0.441 2 | 0.092 7 | 22 |
| $C_{43}$ | 8.720 0 | 0.376 0 | 0.107 3 | 14 |
| $C_{44}$ | 8.980 0 | 0.185 5 | 0.071 8 | 2  |
| $C_{45}$ | 8.950 0 | 0.200 5 | 0.018 5 | 4  |
| $C_{51}$ | 7.860 0 | 0.361 0 | 0.100 8 | 25 |
| $C_{52}$ | 7.800 0 | 0.250 7 | 0.122 3 | 26 |
| $C_{53}$ | 8.380 0 | 0.270 7 | 0.079 2 | 18 |
| $C_{54}$ | 7.970 0 | 0.288 3 | 0.076 8 | 24 |
| $C_{61}$ | 8.220 0 | 0.230 6 | 0.064 4 | 19 |
| $C_{62}$ | 8.870 0 | 0.195 5 | 0.043 4 | 9  |
| $C_{63}$ | 8.590 0 | 0.240 6 | 0.029 5 | 17 |
| $C_{64}$ | 8.810 0 | 0.288 3 | 0.067 6 | 12 |

### 3.3 综合云评价

根据式(10)~式(12),由模糊合成运算对准则层评价指标做综合云评价。同理,将准则层的评价云与其权重进行模糊合成运算,得到空管安全运行保障能力综合云,即目标层的综合云。具体结果如表7所示,可以看出: $E_{x_i}$  综合评价云结果为

8.589 4,  $E_{n_i}$  综合评价云结果为 0.286 4,  $H_{e_i}$  综合评价云结果为 0.077 5; 准则层和目标层的综合云熵值和超熵值都在  $[0.23, 0.35]$  和  $[0.05, 0.10]$  之间, 其值都比较小, 表明评价结果是可靠稳定的。

表 7 综合评价云  
Table 7 Comprehensive evaluation cloud

| 指标    | $E_{x_i}$ | $E_{n_i}$ | $H_{e_i}$ |
|-------|-----------|-----------|-----------|
| $B_1$ | 8.917 9   | 0.276 0   | 0.084 6   |
| $B_2$ | 8.468 0   | 0.315 8   | 0.070 5   |
| $B_3$ | 8.811 8   | 0.270 4   | 0.085 2   |
| $B_4$ | 8.561 4   | 0.340 8   | 0.077 5   |
| $B_5$ | 7.971 7   | 0.299 0   | 0.099 0   |
| $B_6$ | 8.608 6   | 0.236 4   | 0.051 7   |

### 3.4 安全运行保障能力等级确定

基于正向云发生器, 通过 Matlab 绘出准则层和目标层的综合云与基准云的对比图, 据此可以得到准则层和目标层空管安全运行的保障能力等级, 具体如图 2~图 7 所示。

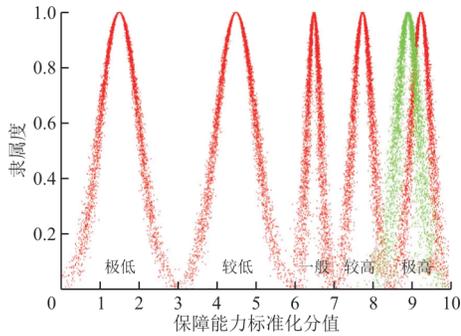


图 2 安全风险管  $B_1$  评价云

Fig. 2 Cloud graph of evaluative cloud  $B_1$

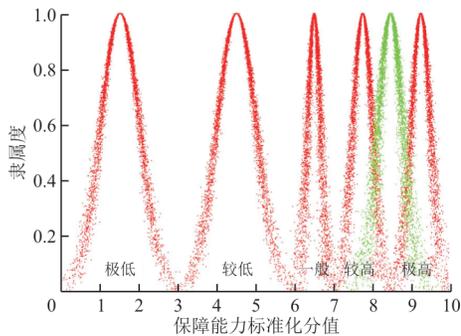


图 3 安全文化管  $B_2$  评价云

Fig. 3 Cloud graph of evaluative cloud  $B_2$

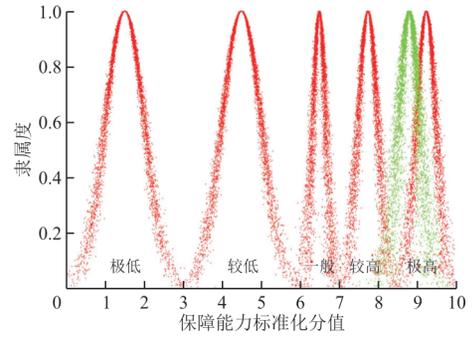


图 4 专业技术能力  $B_3$  评价云

Fig. 4 Cloud graph of evaluative cloud  $B_3$

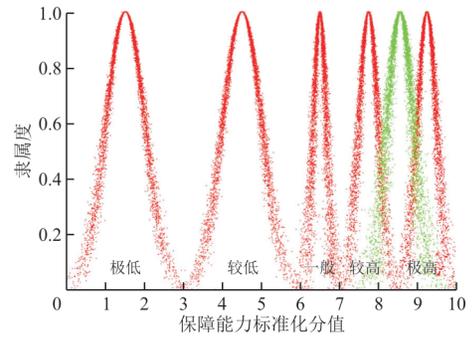


图 5 安全保障投入  $B_4$  评价云

Fig. 5 Cloud graph of evaluative cloud  $B_4$

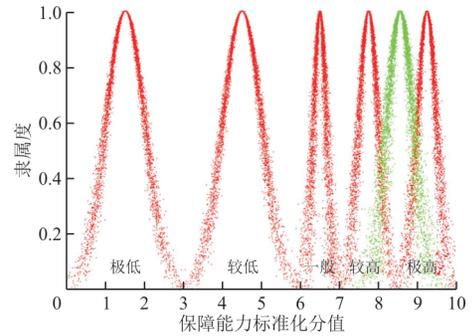


图 6 组织管理程序  $B_5$  评价云

Fig. 6 Cloud graph of evaluative cloud  $B_5$

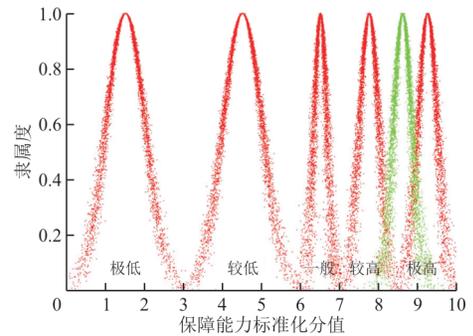


图 7 设备运行能力  $B_6$  评价云

Fig. 7 Cloud graph of evaluative cloud  $B_6$

### 3.5 结果分析

根据所得到的空管安全运行保障能力目标层的云数字特征和基准云的数字特征,采用 Matlab 画出对比图,如图 8 所示,图中深色为基准云,浅色为目标层的综合云。

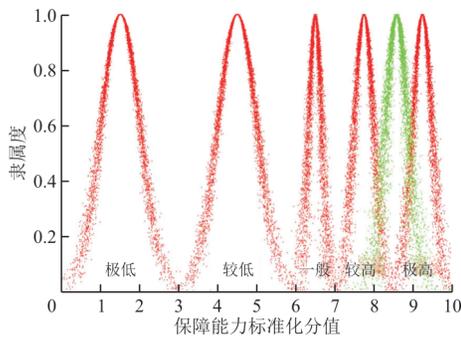


图 8 基准云与综合云

Fig. 8 Reference cloud and integrated cloud

该空管分局整体安全运行保障能力等级期望值为 8.589 4,从图 8 可以看出:其云滴主要集中于 [8, 10],说明空管安全运行的总体保障能力介于较高与极高之间;熵值为 0.286 4,超熵值为 0.077 5,说明云层厚度较小,运行保障能力的评价结果是可靠稳定的。

根据六个准则层指标的云数字特征,将准则层的期望值按照从大到小排序,得到空管安全运行保障能力的优先级顺序依次为安全风险、专业技术能力、设备运行能力、安全保障投入、安全文化管理、组织管理程序。从图 2~图 7 可以看出:六个准则层指标的云数字特征值都落在较高与极高的区间,表明这些指标的保障能力都是比较强的,尤其是安全风险指标,其保障能力等级期望值为 8.917 9,是所有指标中评价价值最高的;而组织管理程序是所有准则层指标中评价价值最低的,其保障能力等级期望值为 7.971 7,说明相对而言组织管理程序是准则层中最薄弱的,应加强空管安全保障能力中的组织程序建设。

将指标层评价指标的期望值按照从小到大进行排序,得到组织交流有效性  $C_{52}$ 、组织结构合理性  $C_{51}$ 、团队合作精神  $C_{54}$ 、安全责任意识  $C_{21}$ 、基础设施投入  $C_{42}$ 、安全价值观建设  $C_{23}$  等指标的安全保障能力期望值是最低的。从表 6 可以看出:组织交流有

效性  $C_{52}$ 、组织结构合理性  $C_{51}$ 、团队合作精神  $C_{54}$  的安全保障能力期望值分别为 7.800 0、7.860 0 和 7.970 0,几乎都处于安全保障能力的较高区间内,这对组织管理程序  $B_5$  评价产生了负面的影响;同样由于安全责任意识  $C_{21}$  和安全价值观建设  $C_{23}$  的安全保障能力期望值也较低,也直接影响了安全文化管理  $B_2$  的评价结果。

基于云模型的评价结果,该空管分局在下一阶段的安全运行保障能力建设中,应重点增强组织交流有效性的建设,改进组织结构的合理性,提升团队合作精神,还应该加强对员工安全责任意识的培养和落实安全价值观建设。

将本文的云模型评价方法与层次分析法<sup>[23]</sup>和模糊综合评价方法<sup>[24]</sup>的评价结果进行对比,具体结果如表 8 所示,可以看出:三种方法的评价结果是非常接近的,但是基于云模型的空管安全运行保障能力评价能够充分利用评价数据的有效信息,实现空管安全保障能力等级分界的模糊化,并且借助云模型中的熵和超熵展现了评价结果的稳定性和可靠性,同时通过云图增强了直观性和可视性。

表 8 三种方法的评价结果对比

Table 8 Comparison of assessment result between three methods

| 指标    | 评价结果    |         |         |
|-------|---------|---------|---------|
|       | 云模型     | 层次分析法   | 模糊综合评价  |
| $B_1$ | 8.917 9 | 8.915 0 | 9.203 1 |
| $B_2$ | 8.468 0 | 8.408 9 | 8.649 5 |
| $B_3$ | 8.811 8 | 8.798 3 | 9.086 6 |
| $B_4$ | 8.561 4 | 8.544 6 | 8.708 2 |
| $B_5$ | 7.971 7 | 7.948 6 | 7.918 4 |
| $B_6$ | 8.608 6 | 8.596 7 | 8.803 9 |

## 4 结 论

(1) 基于空中交通管理安全运行保障所面对的复杂性和不确定性,构建了空管安全运行保障能力云模型评价模型,实现了定性概念与定量数值的有效转换,实践证明其评价结果是可靠的、稳定的。

(2) 引入云模型对空管安全运行保障能力进

行评价,不仅可以通过云图直观形象地给出空管安全运行保障能力的评价结果,而且能够找出影响空管安全运行保障能力的主要因素,明确了改进空管安全运行保障能力的具体方向,为有效解决空管安全运行保障能力评价问题提供了一种新思路。

### 参考文献

- [1] 刘堂卿. 空中交通管制安全风险耦合机理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.  
LIU Tangqing. Study on the coupling mechanism of safety risk for air traffic control[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [2] 罗晓利. 1990—2003年中国民航152起小于间隔飞行事件的分类统计研究[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(12): 26-32.  
LUO Xiaoli. Study on categorized statistics of 152 cases of insufficient separation event of China civil aviation in 1990—2003[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(12): 26-32. (in Chinese)
- [3] MASSIMO F. Modeling safety case evolution—examples from the air traffic management domain[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2006, 39(43): 81-96.
- [4] FLAVIOR L, CAMARGO J J B. A safety assessment methodology applied to CNS/ATM-based air traffic control system[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2011, 96(7): 727-738.
- [5] MICHAL L, JAN M, JACEK S. A system-theoretic accident model and process with human factors analysis and classification system taxonomy[J]. Safety Science, 2018, 110: 393-410.
- [6] JACEK S. The simulation-fuzzy method of assessing the risk of air traffic accidents using the fuzzy risk matrix[J]. Safety Science, 2016, 88: 76-87.
- [7] 唐家文, 董兵. 基于组合赋权的空管系统安全风险物元评价[J]. 航空工程进展, 2021, 12(1): 30-38.  
TANG Jiawen, DONG Bing. Safety risk evaluation of air traffic management system based on combination weights method and matter element model[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(1): 30-38. (in Chinese)
- [8] 万俊强, 张敏. 基于博弈论集对分析的空管风险态势评估[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(11): 142-148.  
WAN Junqiang, ZHANG Min. Evaluation of air traffic control risk situation based on game theory and set pair analysis [J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(11): 142-148. (in Chinese)
- [9] 秦陆佳. 民航华东空管局信息安全管理研究[D]. 上海: 华东政法大学, 2018.  
QIN Lujia. Research on information security management of East China Air Traffic Management Bureau of CAAC [D]. Shanghai: East China University of Political Science and Law, 2018. (in Chinese)
- [10] 胡明华. 我国空管安全管理体系实然性研究[J]. 南京航空航天大学学报(社会科学版), 2007, 9(1): 43-46.  
HU Minghua. An empirical study of China's ATC safety management system [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(Social Sciences), 2007, 9(1): 43-46. (in Chinese)
- [11] 杨建森. 空管系统推进质量安全管理体系统建设的思考[J]. 中国民用航空, 2010, 11(10): 75-77.  
YANG Jiansen. Thoughts on the construction of quality and safety management system in ATC sector [J]. China Civil Aviation, 2010, 11(10): 75-77. (in Chinese)
- [12] 赖欣, 黄邦菊. 空管自动化系统信息安全评估研究[J]. 计算机科学, 2014, 47(s1): 474-476.  
LAI Xin, HUANG Bangju. Research of information security assessment for ATC automation systems [J]. Computer Science, 2014, 47(s1): 474-476. (in Chinese)
- [13] 梁曼, 戴福青, 田佳, 等. 民航空管设施设备系统安全评价研究[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(4): 249-253.  
LIANG Man, DAI Fuqing, TIAN Jia, et al. On the safety evaluation of the ATM facilities and equipment system for civil aviation [J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(4): 249-253. (in Chinese)
- [14] 陈新辉. 浅谈空管班组安全文化的建设[J]. 中山大学学报论丛, 2006, 26(9): 90-92.  
CHEN Xinhui. Discussion on construction of safety culture in air traffic control team [J]. Supplement to the Journal of Sun Yatsen University, 2006, 26(9): 90-92. (in Chinese)
- [15] 孙瑞山, 张凯, 陈梓莉. 空管安全文化量表设计[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(1): 114-119.  
SUN Ruishan, ZHANG Kai, CHEN Zili. On the layout of the safety culture scale for the air traffic control [J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(1): 114-119. (in Chinese)
- [16] GRAVIO G D, PATRIARCA R, MANCINI M, et al. Overall safety performance of the air traffic management system: the Italian ANSP's experience on APF [J]. Research in Transportation Business & Management, 2016, 20: 3-12.
- [17] Performance Review Commission. Performance review report [R]. Brussels: Euro Control, 2017.
- [18] 李德毅, 孟海军. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 38(6): 15-20.  
LI Deyi, MENG Haijun. Membership clouds and membership cloud generators [J]. Journal of Computer Research and Development, 1995, 38(6): 15-20. (in Chinese)
- [19] 中国民用航空局. 空管安全审计[M]. 北京: 中国民用航空局, 2008.  
Civil Aviation Administration of China. Safety audit of air

- traffic management[M]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2008. (in Chinese)
- [20] 中国民用航空局. 空中交通服务安全评估系统[M]. 北京: 中国民用航空局, 2000.  
Civil Aviation Administration of China. Services safety assessment system of air traffic management [M]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2000. (in Chinese)
- [21] 焦彦维, 侯德婷, 周东力, 等. 无人机在复杂电磁环境下的效能评估[J]. 强激光与离子束, 2014, 26(7): 136-141.  
JIAO Yanwei, HOU Deting, ZHOU Dongli, et al. Efficiency evaluation of unmanned aerial vehicle in complex electromagnetic environment [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(7): 136-141. (in Chinese)
- [22] 李琳琳, 路云飞, 张壮, 等. 基于云模型的指挥控制系统效能评估[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(4): 815-822.  
LI Linlin, LU Yunfei, ZHANG Zhuang, et al. Effectiveness evaluation of command and control system based on cloud model [J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(4): 815-822. (in Chinese)
- [23] 李春林, 徐好, 吴琳拥. 基于层次分析法的雷达仙波信号检测与抑制方法[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(6): 843-847.  
LI Chunlin, XU Hao, WU Linyong. Radar "angel-echo" signal detection and suppression method based on analytic hierarchy process [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2020, 49(6): 843-847. (in Chinese)
- [24] 秦寿康. 综合评价原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.  
QIN Shoukang. The principle and application of comprehensive evaluation [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2003. (in Chinese)

#### 作者简介:

唐家文(1985—),男,硕士,讲师。主要研究方向:空中交通安全管理。

董兵(1978—),男,博士,教授。主要研究方向:系统复杂性。

王超峰(1981—),男,博士,副教授。主要研究方向:系统评价。

(编辑:马文静)

(上接第51页)

- [20] 史子颢, 许和勇, 郭润杰, 等. 协同射流在垂直翼流动控制中的应用研究[J/OL]. 航空工程进展. (2021-04-26) [2021-04-30]. [https://www.doc88.com/p-91773057993490.html? r=1](https://www.doc88.com/p-91773057993490.html?r=1).  
SHI Zijie, XU Heyong, GUO Runjie, et al. Application research of flow control using co-flow jet on a vertical tail [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering. (2021-04-26) [2021-04-30]. [https://www.doc88.com/p-91773057993490.html? r=1](https://www.doc88.com/p-91773057993490.html?r=1). (in Chinese)
- [21] DANO B P E, KIRK D, ZHA G C. Experimental investigation of jet mixing of co-flow jet airfoil[C]// Proceeding of the 5th AIAA Flow Control Conference. Chicago, Illinois, USA: AIAA, 2010: 1-19.
- [22] DANO B P E, ZHA G C, CASTILLO M. Experimental study of co-flow jet airfoil performance enhancement using discrete jets[C]// Proceeding of the 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Orlando, Florida, USA: AIAA, 2011: 1-23.
- [23] DANO B P E, LEFEVRE A, ZHA G C. Mixing mechanism of a discrete co-flow jet airfoil[C]// Proceeding of the 41st AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. Honolulu, Hawaii, USA: AIAA, 2011: 1-9.
- [24] ZHANG S L, YANG X D, SONG B F, et al. Numerical and experimental study of the co-flow jet airfoil performance enhancement[C]// Proceeding of the 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Grapevine, Texas, USA: AIAA, 2017: 1-9.
- [25] ZHA G C, YANG Y C, REN Y, et al. Super-lift and thrusting airfoil of coflow jet actuated by micro-compressors [C]// 2018 Flow Control Conference. Atlanta, Georgia, USA: AIAA, 2018: 1-17.

#### 作者简介:

张顺磊(1990—),男,博士研究生。主要研究方向:主动流动控制、设计空气动力学及计算流体力学等。

杨旭东(1971—),男,博士,教授。主要研究方向:设计空气动力学及计算流体力学等。

宋笔锋(1963—),男,博士,教授、博导。主要研究方向:飞行器总体设计、临近空间飞行器技术、微小型飞行器。

王博(1994—),男,博士研究生。主要研究方向:计算流体力学、空气动力学等。

李卓远(1998—),男,硕士研究生。主要研究方向:计算流体力学。

(编辑:马文静)