

# 空中交通管制系统安全绩效评估模型研究

韩豫斌<sup>1</sup>, 朴春子<sup>2</sup>

(1. 中国民用航空华东地区空中交通管理局 安全管理部, 上海 200335)

(2. 中国民航大学 空中交通管理学院, 天津 300300)

**摘要:** 客观准确的安全绩效评估, 可以反映出空中交通管制系统运行的安全状况, 并识别出安全管理存在的薄弱环节。从管制员、空中交通管制设备、环境、管理四方面找出影响系统安全运行的过程性指标, 将过程性指标与结果性指标相结合构建空中交通管制系统安全绩效评估指标体系; 在模糊物元分析法的基础上, 对隶属度函数的确定方法进行改进, 建立基于改进的模糊物元分析法的空中交通管制系统安全绩效评估模型; 利用该模型对某空中交通管制单位的安全绩效进行评估, 评估结果能够反映出该单位的安全状况, 并指出应当改进的环节。结果表明: 本模型可以对空中交通管制系统的安全绩效作出综合评判, 并可以对空中交通管制系统的安全性进行量化描述。

**关键词:** 空中交通管制系统; 安全绩效; 模糊物元分析法; 评估指标体系; 安全运行

中图分类号: V328

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2016.04.013

## Research on Safety Performance Assessment Model of ATC (Air Traffic Control) System

Han Yubin<sup>1</sup>, Piao Chunzi<sup>2</sup>

(1. Safety Management Department, East China Airtraffic Management Bureau of CAAC, Shanghai 200335, China)

(2. College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** Objectively and accurately evaluating the safety performance can reflect the safety status of ATC system operation, and identify the weak links in safety management. Finding key process indicators which affect the system operation safety from the four aspects of controllers, ATC equipment, environment and management, combining process index and result index, the safety performance evaluation index system of air traffic control system is established. On the basis of fuzzy matter-element analysis, the membership function is improved, and the model of ATC system safety performance evaluation based on the improved fuzzy matter-element analysis method is established. Secondary, the evaluation results of evaluating ATC unit safety performance reflect the safety status of the ATC unit, and the segments which should be improved are pointed out. Finally, the results show that this model can make a comprehensive evaluation of air traffic management system and it can make quantitative description to the ATM (Air Traffic Management) system. It is of important significance to improve the level of safety management.

**Key words:** air traffic control system; safety performance; fuzzy matter-element method; evaluate index system; safety operation

收稿日期: 2016-06-13; 修回日期: 2016-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(71171190)

国家空管委基金(GK201410001)

通信作者: 朴春子, 1139282725@qq.com

## 0 引言

民航业的快速发展离不开空中交通管制(Air Traffic Control, 简称 ATC)的保驾护航, 但随着飞行流量的快速增长, 空中交通普遍呈现高或超高密

度的运行状态,这对我国空中交通管制运行保障能力提出了严峻考验。国际民用航空组织(International Civil Aviation Organization,简称 ICAO)在附件十一中明确规定:提供空中交通管制服务的单位要积极建设并实施安全管理体系(Safety Management System,简称 SMS)。安全绩效评估是安全管理体系的一个重要环节,它能够反映空中交通管制系统运行的安全状况,根据评估结果可以识别并改善其中的薄弱环节。因此,有必要对空中交通管制系统安全绩效评估进行研究,以提高空中交通管制系统运行的安全水平。

吴景泰等<sup>[1]</sup>采用改进的数据包络分析(Data Envelopment Analysis,简称 DEA)方法建立具有非阿基米德无穷小量的 CCR 模型,为我国航空公司安全绩效输入/输出指标提供了评价方法。王廷春等<sup>[2]</sup>以职业健康安全管理体系中的管理要素为基础,通过建立评价的因素集、评价集、权重集等提出了模糊综合评价方法。郭进平等<sup>[3]</sup>将层次分析法、群决策和证据理论相结合,提出了企业安全绩效综合评定方法。肖文娟<sup>[4]</sup>基于我国基层空中交通管制部门安全管理现状,提出基层空中交通管制安全绩效评价指标体系,并建立了基于灰色关联分析法的安全绩效评估模型。周驰<sup>[5]</sup>综合考虑了项目风险评估中影响风险因素的正向指标和逆向指标,引入 DEA 方法,并证明出规避风险的有效指标。林峰<sup>[6]</sup>在我国航空公司绩效评价体系的革新探索中,通过典型案例指出现行绩效评价体系的缺陷,并借鉴平衡计分卡理论,对现行绩效评价体系提出创新性建议。孟娜<sup>[7]</sup>基于模糊数学理论对空中交通管制系统进行了综合安全评估。束琬等<sup>[8]</sup>在构建航空维修机组工作效率评估指标体系的基础上,通过 DEA 方法对航空维修机组工作效率进行了综合评估。徐文清<sup>[9]</sup>在现有实时调度策略的基础上,提出了一种基于三层调度器机制的、在空中交通管制系统中更为合适的实时调度策略。李柯等<sup>[10]</sup>和杨智<sup>[11]</sup>从空中交通管制决策模式出发,给出了提高风险决策水平的方法与建议。

目前,有关安全绩效评估方面的研究很多,但是针对空中交通管制系统安全绩效评估方面的研究却相对较少。空中交通管制系统是由管制员、空中交通管制设备、环境和管理四个因素耦合在一起

所形成的大系统。空中交通管制系统安全绩效强调专业性与整合性,研究其绩效指标不能仅考虑单一的研究方面,还应将人机交互、安全文化、安全后果等要素综合起来,因此其评估方法也更加注重客观性、联系性和整体性。

本文首先根据空中交通管制系统实际运行状态,构建一套适用于空中交通管制系统安全绩效的评估指标体系,在结果性指标的基础上,根据最大熵马尔科夫模型综合考量过程性指标;其次运用层次分析法确定各指标的权重;然后使用模糊物元分析法评估模型,并通过改进隶属度函数确定方法来确定各评估指标的取值;最后确定各评估指标各等级的取值范围,并根据最大隶属度原则判断出安全绩效所属的等级。

## 1 构造空中交通管制系统安全绩效评估指标体系

目前,空中交通管制系统实施安全目标责任制,安全目标体系完整而严密,然而以结果为导向的目标考核方式尚不能满足整个空中交通管制系统安全运行的要求。在设计评估指标体系时,应考虑对空中交通管制系统运行安全造成影响的过程性指标。因此在结果性指标的基础上,进一步设计反映安全运行过程的关键业绩指标,既符合理论要求,也具有可行性。

根据最大熵马尔科夫模型,过程性指标应从管制员、空中交通管制设备、环境、管理四方面综合考虑。本文在对某单位实际调研的基础上,通过咨询行业专家,最终确定了 17 个关键的过程性指标。结果性指标则采用事故症候万架次率与不安全事件万架次率这两个指标,其中不安全事件是指事故后果尚未构成事故症候的危险事件。空中交通管制系统安全绩效评估指标体系如表 1 所示。

进行安全绩效评估前,首先要确定评语等级,评语等级的级数越多,则评估结果越准确,但同时会使计算过程变得繁琐,因此要选择合适的评语等级的级数。考虑到三级评语的表述过于宽泛,而七级和九级评语的计算过于复杂,本文采用五个等级的评语,即很好、较好、一般、较差、很差,分别用  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ 、 $M_4$ 、 $M_5$  表示。

表 1 空中交通管制系统安全绩效评估指标体系  
Table 1 Safety performance evaluation index system of ATC

管制系统安全绩效评估指标 C	
一级指标	二级指标
管制员 C <sub>1</sub>	安全意识 C <sub>11</sub>
	操作违章率 C <sub>12</sub>
	班组配合情况 C <sub>13</sub>
	特情处置能力 C <sub>14</sub>
	疲劳程度 C <sub>15</sub>
空中交通管制设备 C <sub>2</sub>	设备故障率 C <sub>21</sub>
	设备维护的及时性 C <sub>22</sub>
	关键部件无配件率 C <sub>23</sub>
环境 C <sub>3</sub>	重要天气预报准确率 C <sub>31</sub>
	管制室工作环境 C <sub>32</sub>
	无线电干扰率 C <sub>33</sub>
管理 C <sub>4</sub>	安全规章制度落实情况 C <sub>41</sub>
	安全目标完成度 C <sub>42</sub>
	安全机构设置 C <sub>43</sub>
	风险管控与缓解 C <sub>44</sub>
	应急程序的完整性 C <sub>45</sub>
	安全文化氛围 C <sub>46</sub>
安全后果 C <sub>5</sub>	事故症候万架次率 C <sub>51</sub>
	不安全事件万架次率 C <sub>52</sub>

## 2 层次分析法确定权重

层次分析法 (Analytical Hierarchy Process, 简称 AHP) 是一种被广泛应用的权重计算方法, 其计算步骤如下。

### (1) 构造判断矩阵

为了使各要素的重要性能够定量地表示出来, 引入 1-9 标度法<sup>[12]</sup>, 对两两指标的重要性进行比较, 得到判断矩阵:

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

### (2) 计算判断矩阵各行元素乘积的 n 次方根:

$$M_i = \left( \prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{1/n} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

### (3) 对向量 $M = (M_1, M_2, \dots, M_m)$ 归一化:

$$W_i = \frac{M_i}{\sum_{j=1}^m M_j} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

$W = (w_1, w_2, \dots, w_m)$  为所求各个指标的特征向量。

### (4) 进行一致性检验

由于篇幅所限, 本文不再对一致性检验过程进行详细介绍, 具体步骤详见文献<sup>[12]</sup>。

## 3 模糊物元评估模型

物元分析法是中国学者蔡文于 20 世纪 80 年代初提出并发展的, 它以现实世界中不相容问题为研究对象, 从定性和定量两方面探讨不相容问题的解决方法<sup>[13]</sup>。物元模型的三要素为: 事物、事物特征及该特征所对应的量值, 当事物特征所对应的量值具有模糊性时, 便构成了一个模糊不相容问题。模糊物元法是把模糊数学与物元理论相结合, 将事物特征对应的量值所具有的模糊性和影响事物的众多因素间的不相容性进行综合分析, 从而解决该模糊不相容问题<sup>[14]</sup>。在本文所研究的模型中, 其三要素为: 空中交通管制系统安全绩效评估指标、评语等级及根据实际运行现状得出的运行数据。

### 3.1 模糊物元的基本概念

模糊物元表示为

$$R = \begin{bmatrix} M \\ C \quad u(x) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $R$  为模糊物元;  $M$  为给定的事物;  $C$  为事物  $M$  的特征;  $u(x)$  为与事物特征  $C$  相对应的模糊量值, 即隶属度。

在本文中,  $C$  指安全绩效评估体系中的指标, 如表 1 所示;  $M$  指五个等级的评语, 分别用  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ 、 $M_4$ 、 $M_5$  表示。

如果给定  $m$  个事物, 它们共有  $n$  个特征, 即  $C_1, C_2, \dots, C_n$ , 分别对应的模糊量值为  $u_1(x_{1i}), u_2(x_{2i}), \dots, u_m(x_{mi})$ , 其中  $i=1, 2, \dots, n$ , 则称  $R_{n \times m}$  为  $m$  个事物的  $n$  维模糊物元。

$$R_{n \times m} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ C_1 & u_1(x_{11}) & u_2(x_{21}) & \cdots & u_m(x_{m1}) \\ C_2 & u_1(x_{12}) & u_2(x_{22}) & \cdots & u_m(x_{m2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_n & u_1(x_{1n}) & u_2(x_{2n}) & \cdots & u_m(x_{mn}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 3.2 模糊物元的评估步骤

#### (1) 确定各评估指标的取值

首先要确定各评估指标所对应的量值, 并将结

果用复合物元形式表示:

$$R_i = \begin{bmatrix} C_i & C_{i1} & X_{i1} \\ & C_{i2} & X_{i2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{ip} & X_{ip} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:  $C_i$  为第  $i$  个一级评价指标, 其中  $i=1, 2, \dots, n, n$  为一级指标的个数, 本文一级指标的个数为 5;

$C_{ik}$  为第  $i$  个一级指标下的第  $k$  个二级指标, 其中  $k=1, 2, \dots, p, p$  为二级指标的个数;  $X_{ik}$  为二级指标所对应的量值, 其取值参考中国华东某空中交通管制局历年统计数据而得。

(2) 确定指标关于各等级的经典域

确定各评估指标关于各等级的取值范围, 可用如下物元模型表示:

$$R_i(M) = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & \dots & M_m \\ C_{i1} & (a_{1i1}, b_{1i1}) & (a_{2i1}, b_{2i1}) & \dots & (a_{mi1}, b_{mi1}) \\ C_{i2} & (a_{1i2}, b_{1i2}) & (a_{2i2}, b_{2i2}) & \dots & (a_{mi2}, b_{mi2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{ip} & (a_{1ip}, b_{1ip}) & (a_{2ip}, b_{2ip}) & \dots & (a_{mip}, b_{mip}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $M_j$  为第  $j$  个等级, 其中  $j=1, 2, \dots, m, m$  为评估等级的个数;  $a_{jik}$  为二级指标  $C_{ik}$  在  $M_j$  等级范围内的取值下限;  $b_{jik}$  为二级指标  $C_{ik}$  在  $M_j$  等级范围内的取值上限。因此在后续计算中引入了安全绩效每个评定等级的上下限。

(3) 确定隶属度函数

确定隶属度函数是模糊物元的核心。本文对隶属度函数的确定方法进行改进。金建平<sup>[15]</sup>采用三角分布组合确定隶属度函数, 其前提是基于隶属度线性变化, 但实际上各指标的隶属度通常是呈非线性变化的, 故采用非线性分布的隶属度函数其评价精度要高于采用线性分布的隶属度函数, 本文选取应用广泛的正态函数来确定隶属度函数。对正向指标(指标值越大安全绩效越好)和负向指标(指标值越大安全绩效越差),  $x_{ik} \in M_j$  的隶属度函数均为

$$u_j(x_{ik}) = e^{-\left(\frac{x_{ik}-p}{q}\right)^2} \quad (8)$$

式中:  $p = |a_{jik} + b_{jik}|/2; q = (|a_{jik} - b_{jik}| \cdot \sqrt{\ln 2})/2。$

通过式(8)计算得出的  $u_j(x_{jk})$  不一定满足归

一性, 需对隶属度进行归一化处理:

$$u_j(x_{ik})' = \frac{u_j(x_{ik})}{\sum_{k=1}^p u_j(x_{ik})} \quad (9)$$

进而得到模糊复合物元:

$$R_i(u) = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & \dots & M_m \\ C_{i1} & u_1(x_{i1})' & u_2(x_{i1})' & \dots & u_m(x_{i1})' \\ C_{i2} & u_1(x_{i2})' & u_2(x_{i2})' & \dots & u_m(x_{i2})' \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{ip} & u_1(x_{ip})' & u_2(x_{ip})' & \dots & u_m(x_{ip})' \end{bmatrix} \quad (10)$$

(4) 多级模糊物元的综合评估

① 第二级综合评价

通过邀请行业专家, 利用层次分析法对一级指标进行两两比较, 构造判断矩阵, 并通过一致性检验, 得到一级和二级指标的权重。

将二级指标的权重 ( $R_{w_{jk}}$ ) 与二级指标的隶属度相乘, 得到各一级指标关于各等级的隶属度矩阵:

$$R_c = R_{w_{jk}} \times R_i(u) = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & \dots & M_m \\ C_1 & \sum_{k=1}^p W_{1k} u_1(x_{1k})' & \sum_{k=1}^p W_{1k} u_2(x_{1k})' & \dots & \sum_{k=1}^p W_{1k} u_m(x_{1k})' \\ C_2 & \sum_{k=1}^p W_{2k} u_1(x_{2k})' & \sum_{k=1}^p W_{2k} u_2(x_{2k})' & \dots & \sum_{k=1}^p W_{2k} u_m(x_{2k})' \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_n & \sum_{k=1}^p W_{nk} u_1(x_{nk})' & \sum_{k=1}^p W_{nk} u_2(x_{nk})' & \dots & \sum_{k=1}^p W_{nk} u_m(x_{nk})' \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ C_1 & d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1m} \\ C_2 & d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_n & d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nm} \end{bmatrix} \quad (11)$$

② 第一级综合评价

将一级指标的权重( $R_{w_i}$ )与一级指标的隶属度相乘,得出评价对象关于各等级的隶属度矩阵:

$$R'_c = R_{w_i} \times R_c$$

$$= \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ C & \sum_{i=1}^n W_1 d_{i1} & \sum_{i=1}^n W_2 d_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^n W_m d_{im} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ C & e_1 & e_2 & \cdots & e_m \end{bmatrix} \quad (12)$$

(5) 确定评估等级

根据最大隶属度原则,可以判断出安全绩效所

属的等级。

### 4 实例分析

以某空中交通管制分局为例,对其安全绩效进行综合评价。根据该单位设定的安全目标,结合专家意见,确定二级指标关于各个等级的取值范围。定性指标的取值采用专家评分法得到,定量指标的取值根据该单位的统计数据得到。二级指标关于各等级的取值范围以及各个指标的实际取值如表 2 所示<sup>[2]</sup>。

表 2 二级指标的经典域与实际取值

Table 2 Classical field and actual value of the secondary index

二级指标	等级 $M_1$	等级 $M_2$	等级 $M_3$	等级 $M_4$	等级 $M_5$	实际取值
$C_{11}$	[95,100]	[85,95]	[70,85]	[60,70]	[0,60]	87
$C_{12}$	[0,1]	[1,3]	[3,5]	[5,7]	[7,10]	1.7
$C_{13}$	[95,100]	[85,95]	[70,85]	[60,70]	[60,70]	89
$C_{14}$	[95,100]	[85,95]	[70,85]	[60,70]	[60,70]	73
$C_{15}$	[95,100]	[85,95]	[70,85]	[60,70]	[60,70]	86
$C_{21}$	[0,0.1]	[0.1,0.3]	[0.3,0.5]	[0.5,1.0]	[1.0,3.0]	0.6
$C_{22}$	[95,100]	[85,95]	[70,85]	[60,70]	[60,70]	93
$C_{23}$	[0,0.1]	[0.1,0.3]	[0.3,0.5]	[0.5,1.0]	[1.0,3.0]	0.3
$C_{31}$	[90,100]	[80,90]	[75,80]	[60,75]	[60,70]	89
$C_{32}$	[95,100]	[85,95]	[70,85]	[60,70]	[60,70]	92
$C_{33}$	[0,0.1]	[0.1,0.3]	[0.3,0.5]	[0.5,1.0]	[1.0,3.0]	0.2
$C_{41}$	[95,100]	[85,95]	[70,85]	[60,70]	[60,70]	78
$C_{42}$	[95,100]	[85,95]	[70,85]	[60,70]	[60,70]	91
$C_{43}$	[95,100]	[85,95]	[70,85]	[60,70]	[60,70]	94
$C_{44}$	[95,100]	[85,95]	[70,85]	[60,70]	[60,70]	87
$C_{45}$	[95,100]	[85,95]	[70,85]	[60,70]	[60,70]	92
$C_{46}$	[95,100]	[85,95]	[70,85]	[60,70]	[60,70]	78
$C_{51}$	[0,0.01]	[0.01,0.03]	[0.03,0.06]	[0.06,0.08]	[0.08,0.1]	0.02
$C_{52}$	[0,0.03]	[0.03,0.06]	[0.06,0.08]	[0.08,0.1]	[0.1,0.2]	0.04

#### 4.1 权重的确定

邀请行业相关专家对一级指标进行两两比较,构造出判断矩阵,并通过一致性检验,得到一级指

标的权重:

$$W = (0.232, 0.105, 0.072, 0.189, 0.402)$$

同理可得二级指标的权重。管制员因素中二级指标权重为

$$W_1 = (0.083, 0.131, 0.116, 0.562, 0.108)$$

空中交通管制设备因素中二级指标权重为

$$W_2 = (0.651, 0.256, 0.093)$$

环境因素中二级指标权重为

$$W_3 = (0.451, 0.193, 0.356)$$

管理因素中各二级指标权重为

$$W_4 = (0.126, 0.118, 0.136, 0.242, 0.281, 0.097)$$

安全后果因素中二级指标权重为

$$W_5 = (0.667, 0.333)$$

## 4.2 综合评估

以管制员因素为例,确定评估指标关于各个等级的隶属度,归一化处理得到模糊复合物元:

$R_1(u)$

$$= \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ C_{11} & 0 & 0.654 & 0.276 & 0 & 0.070 \\ C_{12} & 0.019 & 0.955 & 0.026 & 0 & 0 \\ C_{13} & 0 & 0.786 & 0.158 & 0 & 0.056 \\ C_{14} & 0 & 0 & 0.655 & 0.143 & 0.202 \\ C_{15} & 0 & 0.562 & 0.360 & 0 & 0.078 \end{bmatrix}$$

### (1) 第二层次综合评估

将二级指标的权重与二级指标的隶属度相乘,得出管制员因素关于各风险等级的隶属度矩阵:

$$R_{c_1} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ C_1 & 0.002 & 0.331 & 0.452 & 0.081 & 0.134 \end{bmatrix}$$

同理,可得空中交通管制设备因素关于各风险等级的隶属度矩阵:

$$R_{c_2} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ C_2 & 0.271 & 0.697 & 0.019 & 0 & 0.013 \end{bmatrix}$$

环境因素关于各风险等级的隶属度矩阵:

$$R_{c_3} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ C_3 & 0.161 & 0.765 & 0.036 & 0 & 0.038 \end{bmatrix}$$

管理因素关于各风险等级的隶属度矩阵:

$$R_{c_4} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ C_4 & 0.046 & 0.589 & 0.289 & 0.002 & 0.074 \end{bmatrix}$$

安全后果因素关于各风险等级的隶属度矩阵:

$$R_{c_5} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ C_5 & 0.045 & 0.859 & 0.085 & 0 & 0.011 \end{bmatrix}$$

### (2) 第一层次综合评估

将一级指标的权重与一级指标的隶属度相乘,得出评价对象(即该单位的安全绩效)关于各风险等级的隶属度矩阵:

$$R'_c = R_{w_i} \times R_{c_i} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ C & e_1 & e_2 & \cdots & e_m \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ C & 0.067 & 0.663 & 0.198 & 0.019 & 0.053 \end{bmatrix}$$

根据最大隶属度原则,可知该单位的安全绩效评估等级为  $M_2$ ,即评估结果等级为“较好”,评估结果与该单位的实际运行情况相符,验证了模型的有效性。

对评估结果进行分析,认为该单位整体安全绩效水平仍有待提高。其中,安全规章制度落实与管制员特情处置能力分数较低,因此改善上述两项将成为该单位未来安全工作的重点。针对安全规章制度落实不够问题,应加强单位的安全文化建设,使其从被动服从转变为积极严格执行安全规章制度;同时建立一个从上至下的责任体系,对安全规章制度执行情况进行定期考核,对失职或不负责的人员进行严格问责。针对管制员特情处置能力不足问题,管理者应加大在设备失效、恶劣天气等条件下的特殊训练,切实提高管制员应对各种突发情况的处置能力,防止最后一道防线被完全穿透。

## 5 结论

(1) 本文将过程性指标与结果性指标相结合,建立空中交通管制系统安全绩效评估指标体系。将模糊物元法进行改进,提高了评价精度,运算方法简便、可操作性强。

(2) 构建基于改进的模糊物元的空中交通管制系统安全绩效评估模型。通过所建立的评估模型,可以对空中交通管制系统的安全绩效作出综合评判,并可对空中交通管制系统的安全性进行量化描述。

(3) 通过对某空中交通管制单位的实际安全绩效情况进行算例分析,证明该模型对于实际运行的空中交通管制系统具有积极的借鉴意义。

(4) 可通过该模型找出影响空中交通管制系统安全管理的薄弱环节,对提高空中交通管制系统安全管理、安全运行水平,促进空中交通发展有着重要意义,并可对实际空中交通管制安全运行进行理论性指导与帮助。

### 参考文献

- [1] 吴景泰,王文龙. 基于 DEA 的我国航空公司安全绩效评价研究[J]. 知识经济, 2014(24): 110-111.

- Wu Jingtai, Wang Wenlong. Research on safety performance evaluation of China's airlines based on DEA [J]. Knowledge Economy, 2014(24): 110-111. (in Chinese)
- [2] 王廷春, 孙德青, 于菲菲, 等. 安全管理绩效模糊综合评价研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(3): 185-188.  
Wang Tingchun, Sun Deqing, Yu Feifei, et al. Study on fuzzy comprehensive evaluation of safety management performance[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(3): 185-188. (in Chinese)
- [3] 郭进平, 尚旭光, 卢才武. 基于D-S理论的企业安全绩效综合评定研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(4): 150-155.  
Guo Jinping, Shang Xuguang, Lu Caiwu. Study on enterprise safety performance comprehensive evaluation based on D-S evidence theory [J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(4): 150-155. (in Chinese)
- [4] 肖文娟. 基层空管机构安全绩效评价体系研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.  
Xiao Wenjuan. Research on safety performance evaluation system of air traffic control institutions at the basic level [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [5] 周驰. 基于DEA的项目风险评估的模型及方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.  
Zhou Chi. Research on project risk assessment and model based on DEA [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [6] 林峰. 我国航空公司绩效评价体系的革新探索[D]. 厦门: 厦门大学, 2009.  
Lin Feng. Tentative research into the performance evaluation system for the airlines in China [D]. Xiamen: Xiamen University, 2009. (in Chinese)
- [7] 孟娜. 空中交通管制系统的综合安全评估[D]. 天津: 中国民航大学, 2011.  
Meng Na. Integrated safety assessment of air traffic control system [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2011. (in Chinese)
- [8] 束琬, 张凤林. 基于DEA的航空维修机组工作效率评估[J]. 中国科技信息, 2011(19): 119-120.  
Shu Wan, Zhang Fenglin. Work efficiency evaluation of aviation maintenance unit based on DEA [J]. China Science and Technology Information, 2011(19): 119-120. (in Chinese)
- [9] 徐文清. 空管系统实时调度策略研究及性能评估[D]. 成都: 四川大学, 2006.  
Xu Wenqing. Research on real time scheduling strategy and performance evaluation of ATM system [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006. (in Chinese)
- [10] 李柯, 张胜. 空中交通管理中心安全预警管理信息系统研究[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2007, 29(8): 106-109.  
Li Ke, Zhang Sheng. Management information system of safety early warning for an air traffic control center [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering, 2007, 29(8): 106-109. (in Chinese)
- [11] 杨智. 空中交通管制安全风险预警决策模式及方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.  
Yang Zhi. Research on decision making model and method of air traffic control safety risk early warning [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [12] 高扬, 牟德一. 航空安全评估中的层次分析法——AHP [J]. 中国安全科学学报, 2000, 10(3): 38-41.  
Gao Yang, Mu Deyi. AHP method in assessment of airline safety [J]. China Safety Science Journal, 2000, 10(3): 38-41. (in Chinese)
- [13] 徐田坤. 城市轨道交通网络化运营安全风险评估理论与方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.  
Xu Tiankun. Research on the theory and method of safety risk assessment of urban rail transit network operation [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [14] 杨敏敏. 基于模糊物元的建筑施工绿色度评价模型研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.  
Yang Minmin. Research on evaluation model of construction green degree based on fuzzy matter element [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014. (in Chinese)
- [15] 金建平. 城市燃气企业风险管理研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.  
Jin Jianping. Research on risk management of city gas enterprise [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)

#### 作者简介:

韩豫斌(1982—),男,工程师。主要研究方向:空中交通运输安全管理。

朴春子(1992—),女,硕士研究生。主要研究方向:交通运输规划与管理。

(编辑:马文静)