

# 基于信息熵的危险天气下终端区管制风险评估

张俊强<sup>1</sup> 胡德振<sup>1</sup> 曹悦琪<sup>2</sup> 卢飞<sup>2</sup>

(1. 中国航空无线电电子研究所, 上海, 200241; 2. 中国民航大学空中交通管理学院, 天津, 300300)

**摘要:** 终端区结构复杂、飞机事故多, 其中危险天气对航空器的安全运行影响极大, 因此有必要对危险天气下终端区管制风险进行评估。针对终端区管制系统运行风险性大、易发不安全事件的问题, 提出基于风险信息熵的危险天气条件下终端区管制系统风险评估模型。首先, 通过分析危险天气条件下管制系统的运行过程, 建立管制系统运行中的熵流模型, 然后建立危险天气下终端区管制风险评估指标体系, 给出评估指标灰色关联度属性的计算方法, 利用其反映出的信息熵确定指标权重, 最终建立危险天气下终端区管制风险评估模型, 并通过算例验证了模型的可用性和有效性。

**关键词:** 空中交通管制; 安全管理; 风险评估; 信息熵

**中图分类号:** TN958 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2017)S-0125-06

## Risk Evaluation of Terminal Area Control in Dangerous Weather Based on Information Entropy

ZHANG Junqiang<sup>1</sup>, HU Dezhen<sup>1</sup>, CAO Yueqi<sup>2</sup>, Lu Fei<sup>2</sup>

(1. China National Aeronautical Radio Electronic Research Institute, Shanghai, 200241, China;

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

**Abstract:** The terminal area is complex, the aircraft accident happens frequently, and the dangerous weather in the terminal area control area has a great influence on the safe operation of the aircraft, so it is necessary to evaluate the risk of terminal area control in dangerous weather. A risk assessment model of terminal area control system under dangerous weather conditions based on risk information entropy is proposed. Firstly, the entropy flow model of the control system is established by analyzing the operation process of the control system under the dangerous weather condition. Then the risk assessment index system of the terminal area under dangerous weather is established. The calculation method of the gray relational degree attribute of the evaluation index is given. Finally, the risk assessment model of terminal area control in dangerous weather is established, and the feasibility and effectiveness of the model are verified by an example.

**Key words:** air traffic control; safety management; alerting evaluation; information entropy

随着我国民航事业的不断发展, 民用航空器事故征候事件在逐年增加。各种不断发生的空管不安全事件说明空中交通管制系统(以后简称“空

管”)的安全管理已成为民航事故征候的重要原因之一, 传统的反馈式安全管理模式已无法有效应对。在各类的不安全事件中, 航空器在终端区发生

**基金项目:** 国家自然科学基金(71171190)资助项目; 国家空管委科研项目(GKG201410001)资助项目; 中央高校基本科研业务费(3122014D041)资助项目。

**收稿日期:** 2017-05-15; **修订日期:** 2017-06-20

**通信作者:** 曹悦琪, 女, 研究生, E-mail: 1500703881@qq.com。

**引用格式:** 张俊强, 胡德振, 曹悦琪, 等. 基于信息熵的危险天气下终端区管制风险评估[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(S):. ZHANG Junqiang, HU Dezhen, CAO Yueqi, et al. Risk evaluation of terminal area control in dangerous weather based on information entropy[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(S):.

的不安全事件占到80%以上,而这些不安全事件中由于危险天气所导致的又占到了近50%。被动的“事后”管理的时代已经过去,安全管理注重利用系统的方法,对风险进行主动的“事前”管理。深入分析空管系统运行过程,建立空管安全预警模型,对于提高预警精度、完善安全管理体系有着重要的现实和理论意义。

文献[1]应用安全性评估方法建立了综合考虑空管运营环境的安全评估应用程序。文献[2]在风险预警模式及系统的设计方面提出运用预测和监测技术来实现安全的管理,通过系统的、结构化的方法来评估空管的安全风险。Zolghadri A 和 Cazaurang F 提出运用强数学运算方法快速识别故障,强调风险预警方法的应用,实现了飞行子系统状态的早期监测<sup>[3]</sup>。国内,张兆宁<sup>[4]</sup>等运用过程的方法对整个管制系统进行了风险评估。罗帆等根据安全管理体系实施的相关要求,完成了空管风险评估指标体系的优化<sup>[5]</sup>。袁乐平等据模糊评估和未确知数学理论建立了空管安全风险评估方法<sup>[6]</sup>。

在信息论中,熵可用来表述事件信息发生的不确定性。风险是由于系统运行过程中风险因素的不确定性引起的,因此可以用信息熵来描述这种不确定性,对系统的风险状态进行度量<sup>[7-9]</sup>。因此可以用信息熵来表述终端区管制系统运行风险不确定性的特点。

通过分析空管系统运行的过程,提炼出危险天气条件下终端区管制风险指标,用风险指标所反映的信息熵来判断终端区管制系统运行的风险状态。

## 1 终端区管制系统运行过程分析

空中交通的安全依赖于空中交通管制系统的安全运行。空管系统安全运行的基础是认知空管运行中的风险。所谓风险是指危险发生前的潜在诱因状态,当风险状态突变便会产生不希望看到的结果。终端区管制系统风险是存在于系统运行过程中的,终端区管制系统风险评估要基于空管系统运行过程中的风险,构建风险评估指标,建立风险评估模型,利用该模型获得风险信息,实现危险的事前预防。危险天气条件下终端区空管系统运行过程如图1所示。

熵是关于概率分布的函数,可以用来描述系统由风险的存在而导致的无序程度,从而反映系统风险性变化的过程<sup>[10]</sup>。系统的熵值越大,有序程度越低,风险性越高;熵值越小,有序度越高,风险性越低。空中交通管制系统运行中,系统中潜在的风险因素随着时间的积累产生正熵,而系统与外界交换信息、物质和能量的过程中,由管制部门的风险管理和安全培训形成自组织、自适应,产生负熵。正熵和负熵共同影响着系统的风险性。在已识别的风险因素集的基础上建立空中交通管制系统熵流模型。通过该模型表明管制系统中的正熵和负熵共同作用,推动着风险性的变化而对系统安全运行造成影响如图2所示。

风险发生的不确定性和对空管系统结构影响的不确定以及很多关系难以确切的定义,使得管制系统具有灰色特性,引入灰色关联熵来描述风险的不确定性,建立基于灰色关联熵的风险评估模型。

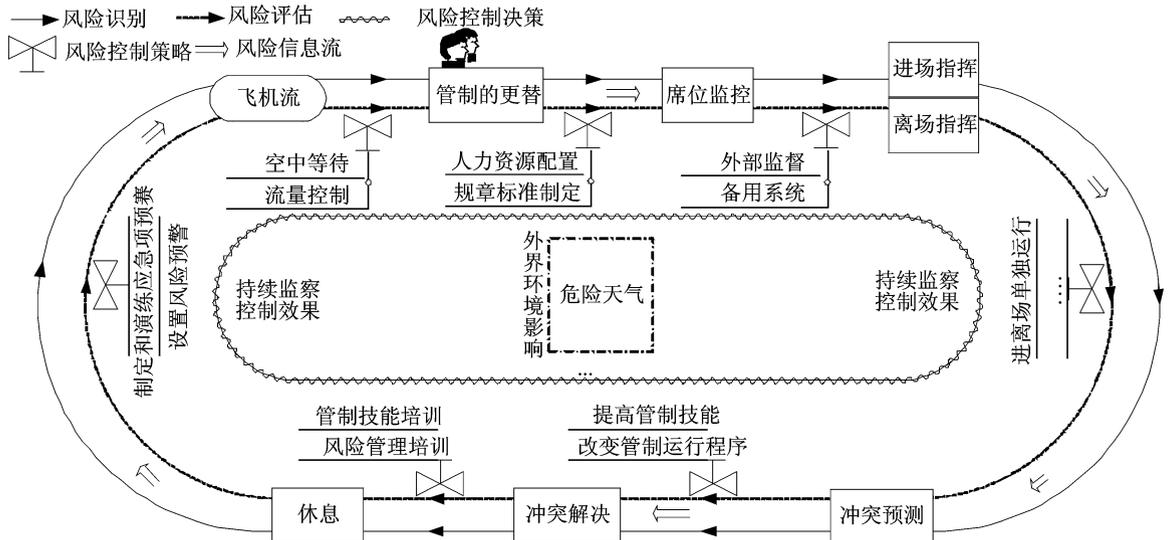


图1 空管系统运行过程图

Fig. 1 Air traffic control system operation process diagram

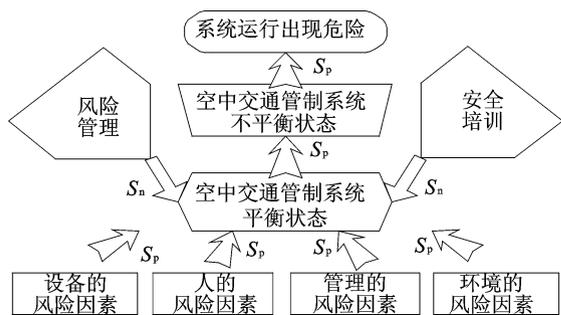


图2 空中交通管制系统运行中的熵流模型

Fig. 2 Entropy flow model in air traffic control system

## 2 风险评估指标体系

危险天气下,终端区管制员面临天气的不断变化、大量航空器短时间的集聚或分散和可用空域限制等多复杂情况,此时管制员要不断地了解天气状况,调配众多的航空器,不断地沟通、协调和发布指令,管制压力会急剧增大,发生不安全事件的可能性也会大大增加。根据空管系统运行过程分析,综合终端的运行特点来建立风险评估指标体系。风险评估指标的选取是基于危险天气下终端区管制系统运行过程中的风险因素,从所识别的众多风险因素中提炼出评估指标。根据危险天气的特性和管制系统运行的过程,识别出注意力不集中、特情处置经验欠缺、强压下的短时和长时记忆力不足;雷达监控不足、管制指令不规范或者错误、飞机速度、高度及航向调配不当和没有监听机组复诵并纠正错误、未按程序操作、遗忘相关限制、管制预案不合理、精力分配不当和遗忘飞行动态;特情处置能力不足、业务知识欠缺和管制技能不成熟;自动化系统的维护保障不足、关键部件的备用保障不足、人员的配备和后勤保障不足和监控、导航、通讯系统技术不达标;空中交通流量密集程度大、空域的限制过多;扇区之间的协作不力和班组成员之间的协作不力、不同管制单位之间的协作不力和临时空域的协调不力这 25 个主要风险因素。

参照文献[11,12],遵循指标选取的适用性和层次性原则,基于危险天气下终端区管制系统运行过程的各个子系统,建立图 3 所示的危险天气下终端区管制风险评估指标体系。

## 3 风险评估模型

管制系统运行过程中导致不安全事件发生的风险因素构成一个随机事件的集合,不同的风险因素与不安全事件的发生具有不同程度的因果联系,这种因果联系可用关联度来衡量。提出使用灰色关联度反映的信息熵来评估管制系统运行的风险



图3 危险天气下的终端区管制风险评估指标体系

Fig. 3 Risk assessment index system for terminal area control in hazardous weather

状态。

### 3.1 风险评估指标的灰色关联度属性

评估指标的灰色关联度是指风险评估指标的统计时间序列和不安全事件发生的时间序列的相似或吻合程度,它描述的是管制系统运行的风险状态与每次不安全事件的相关联系,因此可把灰色关联度作为评估指标的风险属性<sup>[13,14]</sup>。灰色关联度的计算步骤如下:

设风险评估指标的时间序列为

$$X_0 = \{X_0(1), X_0(2), \dots, X_0(n)\}$$

$$X_1 = \{X_1(1), X_1(2), \dots, X_1(n)\}$$

$$X_2 = \{X_2(1), X_2(2), \dots, X_2(n)\}$$

⋮

$$X_j = \{X_j(1), X_j(2), \dots, X_j(n)\}$$

其中,  $X_0 = \{X_0(1), X_0(2), \dots, X_0(n)\}$  为管制不安全事件发生的时间序列。 $X_j$  为第  $j$  个风险评估指标的时间序列。

(1) 计算初值像和差序列

初值像为

$$X'_i = \frac{X_i}{X_i(1)} = \{X'_i(1), X'_i(2), \dots, X'_i(n)\}$$

其中  $i = 1, 2, \dots, j$ ; 根据公式  $\Delta_i(k) = |X'_0(k) - X'_i(k)|$ , 计算出差序列  $\Delta_i(1), \Delta_i(2),$

...,  $\Delta_i(n)$ , 其中  $i=1, 2, \dots, j$ 。

(2) 计算关联系数为

$$x_i(k) = \frac{\min_i \min_k \Delta_i(k) + \beta \max_i \max_k \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \beta \max_i \max_k \Delta_i(k)} \quad (1)$$

式中:  $i=1, 2, \dots, j; k=1, 2, \dots, n; \beta$  为分辨系数,  $\beta \in (0, 1)$ , 一般取 0.5。

(3) 计算关联度为

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma_i(k) \quad i=1, 2, \dots, j; k=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

得到风险评估指标的灰色关联度属性矩阵为

$$R = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n)$$

### 3.2 基于信息熵的风险评估模型

熵是系统状态不确定性的一种反映, 信息熵可以用来表述事件信息发生的不确定性<sup>[15]</sup>。风险是由于系统运行过程中风险因素的不确定性引起的, 因此可以用不安全事件与评估指标时间序列的灰色关联度所反映的信息熵来描述这种不确定性, 评估管制系统运行的风险状态。

风险评估指标的灰色关联度属性矩阵是风险信息的载体, 故可以用信息熵计算所获信息的效用来确定指标权重。灰色关联度取值相差越大, 表示所含信息的效用越低, 信息熵越小, 所得指标权重越大, 表示该指标对不安全事件发生过程的影响很大。设有  $m$  个评估指标, 把灰色关联度作为评估指标的风险属性, 则有属性矩阵  $(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m)$ , 第  $i$  个风险评估指标灰色关联度反映出的信息熵定义为

$$H_i = -f_i \cdot \ln f_i \quad i=1, 2, \dots, m \quad (3)$$

式中  $f_i = \gamma_i / \sum_i \gamma_i$ ,  $f_i$  为第  $i$  个评估指标对管制系统运行风险的关联信息贡献度。信息熵确定权重的方法是基于评估指标确定风险属性值的关联信息贡献度差异, 可确定第  $i$  个评估指标的权重  $\omega_i$  计算公式为

$$\omega_i = H_i / \sum_{i=1}^m H_i \quad (4)$$

将终端区管制系统运行的风险定义为所有风险评估指标的灰色关联度反映出的信息熵所具有的不确定性, 即风险评估指标的信息熵值。终端区管制系统运行的风险值计算公式如下:

单个评估指标的风险值为

$$r_i = \omega_i H_i \quad (5)$$

对计算出的指标风险值进行排序, 可以找到最大和最小的评估指标风险值  $r_{\max}$  和  $r_{\min}$ 。

综合评估指标风险值为

$$R = - \sum_{i=1}^m \omega_i H_i \quad i=1, 2, \dots, m \quad (6)$$

依据导致不安全事件发生的最大和最小评估指标风险值  $r_{\max}$  和  $r_{\min}$  提出如下风险分级方法:

$$\begin{aligned} 0 \sim \frac{1}{5} m \cdot r_{\max} \cdot \left( \frac{r_{\max}}{r_{\min}} \right) & \quad \text{I 级} \\ \frac{1}{5} m \cdot r_{\max} \cdot \left( \frac{r_{\max}}{r_{\min}} \right) \sim \frac{2}{5} m \cdot r_{\max} \cdot \left( \frac{r_{\max}}{r_{\min}} \right) & \quad \text{II 级} \\ \frac{2}{5} m \cdot r_{\max} \cdot \left( \frac{r_{\max}}{r_{\min}} \right) \sim \frac{3}{5} m \cdot r_{\max} \cdot \left( \frac{r_{\max}}{r_{\min}} \right) & \quad \text{III 级} \\ \frac{3}{5} m \cdot r_{\max} \cdot \left( \frac{r_{\max}}{r_{\min}} \right) \sim \frac{4}{5} m \cdot r_{\max} \cdot \left( \frac{r_{\max}}{r_{\min}} \right) & \quad \text{IV 级} \\ \frac{4}{5} m \cdot r_{\max} \cdot \left( \frac{r_{\max}}{r_{\min}} \right) \sim \frac{5}{5} m \cdot r_{\max} \cdot \left( \frac{r_{\max}}{r_{\min}} \right) & \quad \text{V 级} \end{aligned}$$

## 4 终端区管制风险评估算例分析

为了评估终端区管制中心一段时期内管制运行风险状态水平, 统计了国内某终端区管制中心 2010~2014 年危险天气下发生的 54 起不安全事件。通过对每个不安全事件的致因分析和评定, 参考空管领域专家意见, 得到空管不安全事件的致因分析结果, 从而按照风险评估指标统计出各个风险因素每年发生的次数, 参见表 1。

表 1 风险评估指标统计表

Tab. 1 Risk assessment indicators

风险评估指标 / (次数)	2010	2011	2012	2013	2014	
不安全事件	9	10	13	12	10	
情景	$X_1$	5	5	3	5	4
意识	$X_2$	6	5	9	7	4
的建立	$X_3$	6	4	7	4	4
	$X_4$	8	6	9	10	4
	$X_5$	5	6	6	10	4
	$X_6$	5	7	9	6	3
管制	$X_7$	4	3	2	8	4
指挥	$X_8$	4	6	7	5	3
过程	$X_9$	5	7	9	6	3
	$X_{10}$	7	3	7	4	4
	$X_{11}$	6	5	9	7	4
	$X_{12}$	5	5	8	5	3
管制员	$X_{13}$	7	3	7	4	4
应急	$X_{14}$	7	3	7	4	4
响应	$X_{15}$	5	7	9	6	3
	$X_{16}$	1	2	2	2	2
管制系统	$X_{17}$	1	2	2	0	0
的保障	$X_{18}$	2	2	1	2	0
	$X_{19}$	2	1	0	0	1
空域	$X_{20}$	1	2	0	1	0
环境	$X_{21}$	2	2	1	1	0
	$X_{22}$	7	8	4	4	3
协调	$X_{23}$	6	8	7	8	3
体系	$X_{24}$	5	3	3	3	2
	$X_{25}$	4	4	3	4	1

由基于信息熵的终端区管制风险评估模型,根据式(1~5)分别得出灰色关联度、风险评估指标熵值、指标权重和风险值,具体计算结果见表2。

表2 风险评估分析表

Tab.2 Risk assessment analysis

风险 评估指标	$X$	灰色关 联度 $\gamma_i$	指标熵值 $H_i$	指标权重 $\omega_i$	风险值 $r_i$	排 序
情景	$X_1$	0.742 16	0.134 2	0.041 78	0.005 60	11
意识	$X_2$	0.816 47	0.143 2	0.044 58	0.006 38	2
建立	$X_3$	0.696 06	0.128 5	0.040 01	0.005 14	13
	$X_4$	0.759 64	0.136 4	0.0424 6	0.0057 9	10
	$X_5$	0.771 29	0.137 8	0.042 90	0.005 91	6
	$X_6$	0.762 83	0.136 8	0.042 59	0.005 82	8
管制	$X_7$	0.697 33	0.128 6	0.040 04	0.005 14	14
指挥	$X_8$	0.783 18	0.139 2	0.043 34	0.006 03	5
过程	$X_9$	0.762 83	0.136 8	0.042 59	0.005 82	7
	$X_{10}$	0.638 43	0.121 0	0.037 67	0.004 55	18
	$X_{11}$	0.816 47	0.143 2	0.044 58	0.006 38	1
	$X_{12}$	0.79185	0.1403	0.04368	0.00612	4
管制员	$X_{13}$	0.638 43	0.121 0	0.037 67	0.004 55	17
应急	$X_{14}$	0.638 43	0.121 0	0.037 67	0.004 55	19
响应	$X_{15}$	0.762 83	0.136 8	0.042 59	0.005 82	9
管制	$X_{16}$	0.596 35	0.115 3	0.035 89	0.004 13	22
系统	$X_{17}$	0.551 76	0.109 2	0.034 00	0.003 71	25
的保	$X_{18}$	0.675 63	0.125 8	0.039 16	0.004 92	16
障	$X_{19}$	0.553 60	0.109 4	0.034 06	0.003 72	24
空域	$X_{20}$	0.571 95	0.112 0	0.034 87	0.003 90	23
环境	$X_{21}$	0.631 65	0.120 1	0.037 39	0.004 49	20
	$X_{22}$	0.6822 8	0.126 7	0.039 44	0.004 99	15
协调	$X_{23}$	0.805 72	0.141 9	0.044 18	0.006 26	3
体系	$X_{24}$	0.609 33	0.117 1	0.036 46	0.004 26	21
	$X_{25}$	0.703 36	0.129 4	0.040 29	0.005 21	12

根据表2的数据,对计算出来的指标风险值从大到小进行排序,得到风险值较大的10个评估指标是:精力分配不当、注意力不集中、班组成员之间的协作不力、遗忘飞行动态、未按程序操作、管制指令不规范或者错误、遗忘相关限制、飞机速度、高度及航向调配不当、强压下短时长时记忆力不足和雷达监控不足,风险管理者应该重点关注,加强监督管理并进行风险认知等培训。单个指标的信息熵值越大风险值也越大,表示该指标在诱发不安全事件的不确定性越大,即该指标导致不安全事件发生的危险性越大。

通过以上分析可知:精力分配不当的风险值最大为  $r_{\max}=0.006 4$ ,关键部件的备用保障不足的风险值最小为  $r_{\min}=0.003 7$ ,则根据风险分级方法将危险天气下终端区管制的风险状态分为Ⅰ级( $0<R<0.055$ )、Ⅱ级( $0.055<R<0.110$ )、Ⅲ级( $0.110<R<0.165$ )、Ⅳ级( $0.165<R<0.220$ )、Ⅴ

级( $0.220<R<0.275$ )。由式(6)可算出总的评估指标风险值  $R=0.129 33$ ,说明该管制中心近5年的危险天气条件下管制运行的风险状态处于Ⅲ级风险水平。同时,对于超过阈值  $Y_a$  的评估指标,需要及时持续进行持续的监察,采取相应的风险管控措施,降低系统风险发生的可能性。

## 5 结束语

通过对管制系统运行过程的分析,构建风险评估指标体系,引入信息熵,建立基于信息熵的风险评估模型,给出了风险值计算模型和预警阈值的确定方法。该方法可以用于评估终端区管制风险,能为以后空管系统的安全管理提供理论依据。

## 参考文献:

- [1] PASQUINI A, POZZI S. Evaluation of air traffic management procedures-safety assessment in an experimental environment[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2005, 89(1): 105-117.
- [2] PETER S. Risk assessment & mitigation in ATM[J]. Safety Science, 2006, 44(7): 629-655.
- [3] ZOLGHADRI A, CAZAURANG F. Adaptive non-linear state-space modelling for the prediction of daily mean PM 10 concentrations[J]. Environmental Modelling & Software, 2006, 21(6): 885-894.
- [4] 张兆宁,刘兵.基于过程的管制系统运行的灰色风险评价[J].科学技术与工程,2013(17):5071-5077. ZHANG Zhaoning, LIU Bing. Gray risk assessment of operation based on process control system[J]. Science and Technology and Engineering, 2013 (17): 5071-5077.
- [5] 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(8): 115-120. LUO Fan, JIA Guijuan, Chen Gaoming, et al. Optimization design of air traffic safety risk assessment index system [J]. Chinese Journal of Safety Science, 2009 (8): 115-120.
- [6] 袁乐平,孙瑞山,成媛.基于模糊评价和未确知数的空管安全风险评估[J].中国民航学院学报,2006, 24(4): 55-57. YUAN Leping, SUN Ruishan, CHENG Yuan. Fuzzy assessment of air traffic control based on fuzzy evaluation and unascertained number [J]. Journal of China Civil Aviation University, 2006, 24 (4): 55-57.
- [7] 景国勋,孙晓艳,郜阳.基于熵权方法的掘进工作面作业安全评价[J].安全与环境学报,2014,14(06):1-4. JING Guoxun, SUN Xiaoyan, GAO Yang. Safety evaluation of working face based on entropy method

- [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014, 14(06): 1-4.
- [8] SHANNON C E, WEAVER W. The mathematical theory of communication[M]. University of Illinois Press, 1959.
- [9] 张我华,王军,孙林柱. 灾害系统与灾变动力学[M]. 北京:科学出版社, 2011.  
ZHANG Wohua, WANG Jun, SUN Linzhu. Disaster system and catastrophe dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [10] 汪送,王瑛,杜纯,等. 复杂系统风险熵的涌现与动力学传播分析[J]. 安全与环境工程, 2013, 20(2): 118-120.  
WANG Song, WANG Ying, DU Chun, et al. Analysis of emergence and dynamics of complex entropy in complex system [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2013, 20(2): 118-120.
- [11] 吕宗平,张轩铭,张兆宁. 机场管制系统运行的风险识别研究[J]. 航空计算技术, 2014, 44(3): 4-8.  
LV Zongping, ZHANG Xuanming, ZHANG Zhaoning. Study on risk identification of airport control system operation [J]. *Aeronautical Computing Technology*, 2014, 44(3): 4-8.
- [12] 花迎春,邹葆华,田玲玲. 航空维修系统危险源识别和风险分析方法[J]. 中国安全生产科学技术, 2013 9(3): 104-107.  
HUA Yingchun, ZOU Baohua, TIAN Lingling. Method of hazard recognition and risk analysis in aviation maintenance system[J]. *Journal of Safety and Technology*, 2013, 9(3): 104-107
- [13] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2002.  
DENG Jvlong. Gray theory foundation [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002.
- [14] 刘思峰,郭天榜,党耀国,等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2000.  
LIU Sifeng, GUO Tianbang, DANG Yaoguo, et al. Gray system theory and its application [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [15] 杨小玲. 多属性决策分析及其在洪灾风险评价中的应用研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2012.  
YANG Xiaoling. Mult-attribute decision-making analysis and its application in flood risk assessment [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.