

航空兵战术训练空域规划方案安全性评估

刘威辰, 甘旭升, 姚登凯, 刘彦茂✉

(空军工程大学空管领航学院, 西安, 710051)

摘要 根据航空兵战术训练的特点和实际情况,结合层次分析法(AHP)、熵值理论与模糊物元理论,构建了基于 AHP-熵权的航空兵战术训练空域规划方案安全性的评级指标体系模糊物元模型。并在此基础上利用该模型对方案体系中的环境与管理、装备和任务等方面进行了系统的分析和评价。结果显示,这一模型能够用于评价样本和评价标准的远近程度关系计算,且能够同时对各个评价样本进行评价,基于熵权法和 AHP 的有机结合,使评价的主观性与客观性都被充分考虑,具有较好的实用性。

关键词 空域规划方案;安全性评估;模糊物元模型;层次分析法;熵权法

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.02.001

中图分类号 V35;X93 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)02-0001-05

An Evaluation of Safety on Aerial Tactical Training Airspace Planning

LIU Weichen, GAN Xusheng, YAO Dengkai, LIU Yanmao

(Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: According to the characteristics and reality of aerial tactical training in light of an analytic hierarchy process (AHP), entropy theory and fuzzy matter-element theory, this paper builds a fuzzy matter-element model of security evaluation index system for the aerial tactical training space designing scheme based on AHP-entropy, and evaluates 17 indexes of task, equipment, environment and management in the scheme system on the basis of this model. The result indicates that this model is capable of finding the connections, computing the distance degree between evaluation examples and standards, and evaluating multiple examples at the same time. In careful consideration of subjectivity and objectivity in evaluating based on the combination of AHP and entropy, the evaluation is very practical.

Key words: Training airspace designing scheme; Safety evaluation; fuzzy matter-element model; analytic hierarchy process; entropy weight method

划设航空兵训练空域,是为了适应空军战斗力生成模式转型建设需求,同时也是有效缓解我国空域资源需求矛盾突出问题的有效手段。将航空兵战术飞行训练进行集中规划,合理调配空

域资源,从而实现军民航的协调可持续发展。划设战术训练空域需要遵循“任务优先、经济高效、确保安全”基本原则,其中,在评价航空兵战术训练空域规划方案的过程中,安全性是一个至关重

收稿日期:2016-10-11

基金项目:国家自然科学基金(61472441)

作者简介:刘威辰(1993—),男,陕西西安人,硕士生,主要从事空域与流量管理研究. E-mail: lwvlwc@126.com

通讯作者:刘彦茂(1966—),男,河北蠡县人,教授,主要从事指挥引导研究. E-mail:lwvlwc@126.com

引用格式:刘威辰,甘旭升,姚登凯,等.航空兵战术训练空域规划方案安全性评估[J].空军工程大学学报(自然科学版),2017,18(2):1-5. LIU Weichen, GAN Xusheng, YAO Dengkai, et al. An Evaluation of Safety on Aerial Tactical Training Airspace Planning[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2017, 18(2): 1-5.

要的方面,决定了方案的成功与否,就安全性评估方案的发展历程而言,主要经历了3个阶段,分别为快速模拟^[1]、实时模拟^[2]、概率解析^[3]。国外主要的评估方法有Reich模型(Reich model)^[4-6]、航路交叉模型(intersection model)^[7]、几何冲突模型(geometric conflict model)^[8-9]等,文献[10~12]主要介绍了国内的一些安全性评估方法研究现状。而这些都是对民航空域规划方案的安全性进行了评估,在评估背景上与我国军航空域有较大出入。

1 评估指标体系的确定

影响航空兵战术训练空域规划方案安全性的因素有很多,本文依据可操作性、过程性、变动性、合理性、目的性等原则,依据“任务-装备-环境-管理”构建训练空域规划方案安全性安全评价指标体系,建立了不同层次的指标,并在此基础上结合相关文献的研究成果构建了相应的评估体系。见图1。

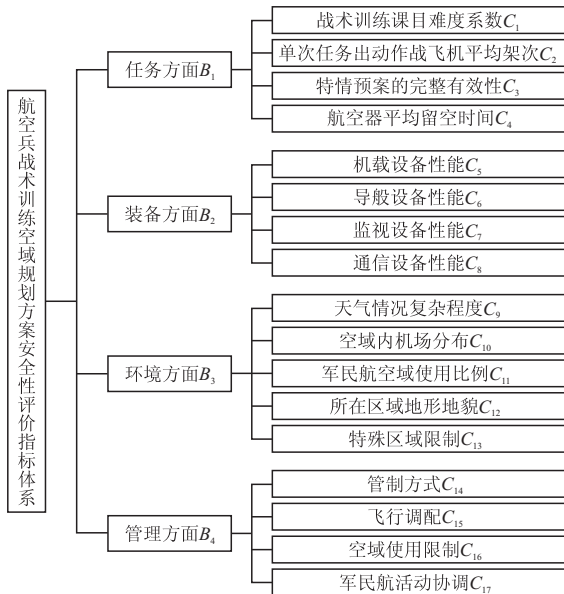


图1 航空兵战术训练空域规划方案安全评价指标体系

Fig.1 Safety assessment index system of aerial tactical training airspace designing scheme

在任务方面,不同的战术训练课目,其难度系数、出动作战飞机架次、航空器留空时间等都会不同,对空域范围的需求也会不同。在装备方面,机载、导航、监视、通信等设备的性能高低决定了飞机所采用的飞行程序,性能越好所能采用的飞行程序就越精密,方案的安全性也就会提高。在环境方面,空域环境越复杂,方案的安全性就越低。在管理方面,管制方式(程序管制与雷达管制)的不同,飞行调

配是否合理,军民航活动协调是否得当都影响着飞行是否安全、合理、高效,直接或间接地影响方案的安全性。

2 建立模糊物元评价模型

2.1 构建复合模糊物元

有序三元组是物元分析理论中事物基本模糊物元的常用描述方式^[13-14],可将其表示成 $R = [M, C, x]$ 或 $R = [M, C, C(M)]$ 。其中: M 代表某一给定的事物, C 代表特征, x 代表模糊性量值。若 M 有 n 个特征 C_1, C_2, \dots, C_n 及其量值 x_1, x_2, \dots, x_n ,则称 R 为 n 维模糊物元。 m 个事物的 n 维物元组合可得到复合模糊物元

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

式中: R_{mm} 表示 m 个事物的 n 个模糊特征的复合物元; M_i 表示第 i 个事物($i = 1, 2, \dots, m$); C_j 表示第 j 个特征($j = 1, 2, \dots, n$); x_{ij} 为第 i 个事物第 j 个特征对应量值的从优隶属度($i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$)。

2.2 计算从优隶属度

从优隶属度通常都是大于0的值,指的是模糊物元单项指标模糊量值同标准方案中相应指标模糊量值的隶属情况,鉴于指标的不同,可能存在正指标和逆指标,因此,往往需要采用不同的算法来计算从优隶属度。

对于逆指标:

$$u_{ij} = (\max x_{ij} - x_{ij}) / (\max x_{ij} - \min x_{ij}) \quad (2)$$

对于正指标:

$$u_{ij} = (x_{ij} - \min x_{ij}) / (\max x_{ij} - \min x_{ij}) \quad (3)$$

式中: u_{ij} 表示从优隶属度; $\max x_{ij}$ 和 $\min x_{ij}$ 分别表示各评价指标中第 j 项特征所对应的最大量值和最小量值。进而得到从优隶属度模糊物元:

$$\tilde{R}_{mm} = \begin{bmatrix} & C_1 & C_2 & \cdots & C_n \\ M_1 & u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ M_2 & u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ M_m & u_{m1} & u_{m2} & \cdots & u_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (4)$$

2.3 构建差平方复合模糊物元

通过式(4)可得 n 维标准模糊物元,标准方案的 n 维标准模糊物元 R_{0n} 可以通过 \tilde{R}_{mm} 中不同方案的

从优隶属度的最值来确定,逆指标采用最小值,正指标采用最大值,具体如下:

$$\mathbf{R}_{0n} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & \cdots & C_n \\ M_0 & u_{01} & u_{02} & \cdots & u_{0n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

若以 $\Delta_{ij} = (u_{0j} - u_{ij})^2$ 表示标准模糊物元 \mathbf{R}_{0n} 与从优隶属度模糊物元 $\bar{\mathbf{R}}_{mm}$ 中各项差的平方,可得到差平方复合模糊物元

$$\mathbf{R}_{\Delta} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & \cdots & C_n \\ M_1 & \Delta_{11} & \Delta_{12} & \cdots & \Delta_{1n} \\ M_2 & \Delta_{21} & \Delta_{22} & \cdots & \Delta_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_m & \Delta_{m1} & \Delta_{m2} & \cdots & \Delta_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (6)$$

2.4 为评价因子综合赋权

2.4.1 层次分析法赋权

上世纪 70 年代初期, T. L. Saaty 对多目标复杂问题进行了系统的分析和研究,并在此基础上提出了层次分析法(AHP),该方法在数据比较缺乏且目标结构比较复杂的情况中尤为适用。

在一致性检验的基础上可得到评价指标权重: $\mathbf{W} = (W_1, W_2, \dots, W_n)$

2.4.2 熵权法赋权

在模糊综合评价方法中,各评价指标的客观权重通常是通过计算超标比来确定,反映出具体数据对评价结果的贡献度,但此方法包含以下一些缺点,当评价对象数量不唯一时,在每个评价对象下的所有评价指标的权重值都要计算,而计算得到的权重值仅考虑了个体指标的特征,并且无法描述各评价对象间的相关联系。同时,空域规划方案安全性评估是一个多目标的评价过程,其包含多个评价类型且各评价类型间的影响因素差异很大。因此,此客观权重的确定方法不适用于空域规划方案的安全性评估。

熵权理论是一种有效客观的赋权方法,可对系统信息的效用和有序度进行评价,所以,在确定评价指标之间的重要性排序时,本文采用的方法主要是熵权系数法,这样可以获得更加准确和可靠的指标权重,通常来讲,系统的无序度和权重存在着明显的正相关关系,计算流程如下:

1) 构建 m 个事物 n 个评价指标判断矩阵:

$$\mathbf{R} = (x_{ij})_{m \times n}, (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

2) 将判断矩阵 \mathbf{R} 进行归一化,得矩阵 \mathbf{B} , \mathbf{B} 的元素为:

$$b_{ij} = (x_{ij} - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (8)$$

式中:在保持评价指标不变的情况下,用 x_{\min} 表示不

同事物中的最不满意者,最满意者则用 x_{\max} 表示。

3) 根据熵的定义, m 个事物 n 个评价指标中的熵为:

$$H_i = (\sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij}) / (\ln m) \quad (9)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$; $f_{ij} = b_{ij} / \sum_{j=1}^m b_{ij}$ 。显然,当 $f_{ij} = 0$ 时, $\ln f_{ij}$ 无意义,因此, $f_{ij} = 0$ 的计算应加以修正,将其定义为:

$$f_{ij} = (1 + b_{ij}) / \sum_{j=1}^m (1 + b_{ij}) \quad (10)$$

4) 计算评价指标的熵权

$$\omega_i = (1 + H_i) / (n - \sum_{i=1}^n H_i), \text{且满足 } \sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (11)$$

于是,得到评价指标的熵权向量: $\mathbf{w} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$

2.4.3 组合权重

综合考虑熵权法和层次分析法(AHP)优缺点,将两者结合可计算出组合权重,具体如下^[15]:

$$\bar{\omega} = \left\{ \frac{W_1 \omega_1}{\sum_{j=1}^n W_j \omega_j}, \frac{W_2 \omega_2}{\sum_{j=1}^n W_j \omega_j}, \dots, \frac{W_n \omega_n}{\sum_{j=1}^n W_j \omega_j} \right\} = (\bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2, \dots, \bar{\omega}_n)' \quad (12)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^n \bar{\omega}_j = 1; \bar{\omega}_j \geq 0$$

显然,组合权重 $\bar{\omega}_j$ 与 W_j 和 ω_j 应当尽量保持一致,基于最小相对信息熵原理可得:

$$\min F = \sum_{j=1}^n \bar{\omega}_j (\ln \bar{\omega}_j - \ln W_j) + \sum_{j=1}^n \bar{\omega}_j (\ln \bar{\omega}_j - \ln \omega_j) \quad (13)$$

采用拉格朗日乘法对式(13)进行优化,由此可以得到相应的组合权重:

$$\bar{\omega} = \left\{ (W_1 \omega_1)^{0.5} / \sum_{j=1}^n (W_j \omega_j)^{0.5}, (W_2 \omega_2)^{0.5} / \sum_{j=1}^n (W_j \omega_j)^{0.5}, \dots, (W_n \omega_n)^{0.5} / \sum_{j=1}^n (W_j \omega_j)^{0.5} \right\} = (\bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2, \dots, \bar{\omega}_n)' \quad (14)$$

2.5 计算欧式贴近度

标准样本和被评价样本之间的接近程度通常用欧氏贴近度来表示,可以利用欧氏贴近度的数值对被评价样本的优劣进行排序,还可以基于被评价样本和标准样本的接近情况划分相应的类别,具体计算流程如下:

$$R_{PH} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ PH_j & PH_1 & PH_2 & \cdots & PH_m \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: $PH_i = 1 - \sqrt{\sum_{j=1}^n \bar{\omega}_j \Delta_{ij}}$, ($i = 1, 2, \dots, n$) 为第 i 个评价方案与标准方案之间的相互接近度; $\bar{\omega}_j$ 为第 j 个指标的权重值 ($j = 1, 2, \dots, n$)。

3 实例分析

3.1 构造复合模糊物元

分别对 5 个训练空域的规划方案的总体安全状况进行综合评价, 分别选出 5 位空管安全方面专家以及 5 位有过飞行经历的人员, 对表 1 中无法直接获取数据的评价指标 $C_3, C_5, C_6, C_7, C_8, C_{10}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{15}, C_{16}, C_{17}$ 分别按照百分制进行评分, 最后将 5 个规划方案各个指标的专家打分和采集的数据进行平均, 得到的原始数据表 1, 并由此构成复合模糊物元。

$$R_{5,17} = \begin{bmatrix} 0.72 & 3 & 72 & 2.30 & 94 & 88 & 89 & 86 & 0.05 & 91 & 0.45 & 84 & 80 & 82 & 85 & 82 & 76 \\ 0.87 & 4 & 74 & 2.06 & 92 & 86 & 91 & 88 & 0.02 & 90 & 0.53 & 83 & 76 & 80 & 83 & 85 & 82 \\ 0.85 & 4 & 72 & 2.10 & 89 & 90 & 92 & 90 & 0.04 & 85 & 0.24 & 90 & 81 & 82 & 86 & 87 & 80 \\ 0.76 & 3 & 75 & 2.03 & 98 & 93 & 94 & 86 & 0.07 & 84 & 0.19 & 88 & 72 & 76 & 90 & 83 & 77 \\ 0.82 & 3 & 70 & 1.65 & 90 & 91 & 89 & 89 & 0.03 & 92 & 0.36 & 85 & 82 & 85 & 82 & 90 & 88 \end{bmatrix}$$

3.2 构造从优隶属度模糊物元

根据实际可知, $C_1, C_2, C_4, C_9, C_{11}$ 为逆指标, 则将 $R_{5,17}$ 中这 5 个指标对应的数据代入式(2); 而 $C_3,$

$$\bar{R}_{5,17} = \begin{bmatrix} 1.00 & 1.00 & 0.40 & 0.00 & \cdots & 0.80 & 0.67 & 0.38 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.80 & 0.37 & \cdots & 0.40 & 0.44 & 0.13 & 0.38 & 0.5 \\ 0.13 & 0.00 & 0.40 & 0.31 & \cdots & 0.90 & 0.67 & 0.50 & 0.63 & 0.33 \\ 0.73 & 1.00 & 1.00 & 0.42 & \cdots & 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.13 & 0.08 \\ 0.33 & 1.00 & 0.00 & 1.00 & \cdots & 1.00 & 1.00 & 0.00 & 1.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

3.3 构造最优模糊物元与差平方复合模糊物元

取 $\bar{R}_{5,17}$ 中各列指标隶属度的最大值, 可得标准模糊物元:

$$R_{\Delta} = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.36 & 1.00 & \cdots & 0.04 & 0.11 & 0.38 & 1.00 & 1.00 \\ 1.00 & 1.00 & 0.04 & 0.40 & \cdots & 0.36 & 0.31 & 0.76 & 0.38 & 0.25 \\ 0.76 & 1.00 & 0.36 & 0.48 & \cdots & 0.01 & 0.11 & 0.25 & 0.14 & 0.45 \\ 0.07 & 0.00 & 0.00 & 0.34 & \cdots & 1.00 & 1.00 & 0.00 & 0.76 & 0.85 \\ 0.45 & 0.00 & 1.00 & 0.00 & \cdots & 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$$

3.4 确定指标权重系数

使 10 位专家 5 个方案的所有指标进行打分, 并利用层次分析法算出指标权重, 并将 $R_{5,17}$ 中的数据代入式(7)~(11)计算出熵权重, 最后利用综合赋权公式(12)~(14)可得到 17 个评价指标的权重系

表 1 各训练空域规划方案安全性评价原始数据

Tab. 1 Raw data of safety assessment for each training airspacedesigning scheme

指标/训练空域	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
C_1	0.72	0.87	0.85	0.76	0.82
C_2	3	4	4	3	3
C_3	72	74	72	75	70
C_4	2.3	2.06	2.1	2.03	1.65
C_5	94	92	89	98	90
C_6	88	86	90	93	91
C_7	89	91	92	94	89
C_8	86	88	90	86	89
C_9	0.05	0.02	0.04	0.07	0.03
C_{10}	91	90	85	84	92
C_{11}	0.45	0.53	0.24	0.19	0.36
C_{12}	84	83	90	88	85
C_{13}	80	76	81	72	82
C_{14}	82	80	82	76	85
C_{15}	85	83	86	90	82
C_{16}	82	85	87	83	90
C_{17}	76	82	80	77	88

$C_5, C_6, C_7, C_8, C_{10}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{15}, C_{16}, C_{17}$, 为正指标, 则将 $R_{5,17}$ 中这 13 个指标对应的数据带入式(3), 联立求解可以计算出从优隶属度模糊物元, 具体如下:

$$R_{0,17} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & \cdots & C_n \\ M_0 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

计算 $\bar{R}_{5,17}$ 与 $R_{0,17}$ 的差平方, 构造差平方复合模糊物元:

$$R_{\Delta} = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.36 & 1.00 & \cdots & 0.04 & 0.11 & 0.38 & 1.00 & 1.00 \\ 1.00 & 1.00 & 0.04 & 0.40 & \cdots & 0.36 & 0.31 & 0.76 & 0.38 & 0.25 \\ 0.76 & 1.00 & 0.36 & 0.48 & \cdots & 0.01 & 0.11 & 0.25 & 0.14 & 0.45 \\ 0.07 & 0.00 & 0.00 & 0.34 & \cdots & 1.00 & 1.00 & 0.00 & 0.76 & 0.85 \\ 0.45 & 0.00 & 1.00 & 0.00 & \cdots & 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$$

数, 见表 2。

3.5 欧氏贴近度计算与综合评价

根据式(15)计算 5 个训练空域规划方案的欧氏贴近度, 计算结果如表 3, 同时根据欧氏贴近度的大小可得到 5 个规划方案安全评价的排序。

表 2 各训练空域规划方案安全评价指标综合权重

Tab.2 Comprehensive weight of safety assessment index
foreach training airspace designing scheme

评价指标	复合权重	评价指标	复合权重
C ₁	0.056 7	C ₁₀	0.056 8
C ₂	0.061 6	C ₁₁	0.058 5
C ₃	0.057 5	C ₁₈	0.060 2
C ₄	0.055 7	C ₁₃	0.055 0
C ₅	0.060 7	C ₁₄	0.056 5
C ₆	0.057 7	C ₁₅	0.060 8
C ₇	0.061 0	C ₁₆	0.060 3
C ₈	0.059 8	C ₁₇	0.061 4
C ₉	0.059 6		

表 3 欧式贴近度计算值

Tab.3 Euclidean closeness degree value

方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
0.491 3	0.508 7	0.344 9	0.413 4	0.308 1

根据表 3 的排序结果,5 个训练空域规划方案的安全评价顺序为,方案 2>方案 1>方案 4>方案 3>方案 5,其中,方案 2 最为安全。

4 结语

随着空军军事训练转型的推进,军事训练时间、战术训练比重不断提高,多兵种合练、体系对抗训练已成常态,对空域等资源需求逐年增加。同时,我民用航空运输进入持续快速发展的新阶段,对空域的需求也日益迫切。因此,合理而高效地划设航空兵战术训练空域是必要的,而“安全性”正是评价一个空域规划方案是否合理的重要判据。本文通过对航空兵战术训练空域的特点进行了分析,结合实际需求,提出了新的训练空域规划方案安全性评估方法,完善了军航训练空域划设的理论体系。

参考文献(References):

- [1] SWEET D N, MANIKONDA V, ARONSON J S, et al. Fast-Time Simulation System for Analysis of Advanced Air Transportation Concepts [C]// Proceedings of the AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, 2002: 5-8.
- [2] KOPARDEKAR P H, SCHWARTZ A, MAGYARITS S, et al. Airspace Complexity Measurement: An Air Traffic Control Simulation Analysis [J]. International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice, 2009, 16(1): 61-70.
- [3] DUNLAYJR W J. Analytical Models of Perceived Air Traffic Control Conflicts [J]. Transportation Science, 1975, 9(2): 149-164.
- [4] REICH P G. Analysis of Long Range Air Traffic Systems; Separation Standards I [J]. Journal of the Institute of Navigation, 1966, 19(1): 88-89.
- [5] REICH P G. Analysis of Long Range Air Traffic

- Systems; Separation Standards II [J]. Journal of the Institute of Navigation, 1966, 19(2): 169-186.
- [6] REICH P G. Analysis of Long Range Air Traffic Systems; Separation Standards III [J]. Journal of the Institute of Navigation, 1966, 19(3): 331-347.
- [7] SCHMIDT D K. On the Conflict Frequency at Air Route Intersections [J]. Transportation Research, 1977, 11(5): 351-355.
- [8] PAIELLI R A, ERZBERGER H. Conflict Probability for Free Flight [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1977, 20(3): 588-596.
- [9] PAIELLI R A, ERZBERGER H. Conflict Probability Estimation Generalized to Non-Level Flight [J]. Air Traffic Control Quarterly, 1999, 7(3): 195-222.
- [10] 张林昌,王守兴. 我国航路监视下横向间隔标准的确定方法[R]. 北京:北京航空航天大学,1991.
ZHANG L C, WANG S X. Method for Determining Lateral Separation Standard under Route Surveillance [R]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1991. (in Chinese)
- [11] 李春锦,王英勋. 关于中国在 6 000~12 000 米高度之间实施 600 米垂直间隔的分析计算报告 [R]. 北京:北京航空航天大学空管研究中心,1992.
LI C J, WANG Y X. Report of Analysis and Calculation of 600 Meters Vertically Separation Implementation on Space between 6 000~12 000 Meters Altitude in China [R]. Beijing: Air Traffic Management Research Center of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1992. (in Chinese)
- [12] 徐肖豪,马子兴,聂润兔. 空管二次雷达最小间隔的分析与比较研究 [J]. 交通运输工程与信息学报, 2004, 2(1): 20-24.
XU X H, MA Z X, NIE R T. Analysis and Comparison Research of the Minimum Separation for the Secondary Surveillance Radar in Air Traffic Control [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2004, 2(1): 20-24. (in Chinese)
- [13] 郇建强,杨晓华,陆桂华,等. 流域水资源承载能力综合评价的改进隶属度模糊物元模型 [J]. 水力发电学报, 2009, 28(1): 78-83.
LI J Q, YANG X H, LU G H, et al. Fuzzy Matter-Element Model Based on Improved Membership Degree for Comprehensive Assessment of Water Resources Carrying Capacity in River Basins [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009 28(1): 78-83. (in Chinese)
- [14] 金菊良,王文圣,洪天求,等. 流域水安全智能评价方法的理论基础探讨 [J]. 水利学报, 2006, 37(8): 918-925.
JIN J L, WANG W S, HONG T Q, et al. Theoretical Basis of Intelligent Evaluation Methods of Watershed Water Security [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(8): 918-925. (in Chinese)
- [15] 曾凡伟. 基于层次-熵权法的地质公园综合评价—以兴文、四姑娘山、剑门关地质公园为例 [D]. 成都:成都理工大学, 2014.
ZENG F W. Geopark's Comprehensive Evaluation Based on Hierarchy-Entropy Weight Method-A Case Study of Xingwen, Siguniangshan and Jianmenguan-Geoparks [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014. (in Chinese)