

基于离差平方和最大化的飞行训练任务评估方法

李海明^{1,2}, 虞 钢^{1,3}, 尚国彬^{1,2}

(1. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049; 2. 93427 部队, 北京 101114;
3. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 本文提出一种基于离差平方和最大化的飞行训练任务评估方法。通过对飞行训练任务评估问题的分析, 建立了飞行训练评估指标体系。同时运用层次分析法和熵权法分别确定评估指标的主、客观权重, 构建基于离差平方和最大化的目标函数, 并求解得到基于主客观权重的组合权重。将组合权重与 TOPSIS 法结合, 建立飞行训练任务评估模型, 实现对训练任务的评估排序。通过案例分析, 验证了该评估方法的可行性与有效性, 具有一定的工程实践价值。

关键词: 飞行训练; 评估; 离差平方和; 组合权重; TOPSIS 法

Assessment Method of Flight Training Mission Based on the Maximum Square Sum of Deviations

LI Hai-ming^{1,2}, YU Gang^{1,3}, SHANG Guo-bin^{1,2}

(1. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;
2. 93427 Troops, Beijing 101114; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract: An assessment method of flight training mission is proposed in this paper. Firstly, the assessment system of flight training is constructed after analyzing the assessment problem of flight training mission. Secondly, the subjective and objective weight of assessment indices are determined by using analytic hierarchy process and the entropy weight method separately, and the objective function based on square sum of deviations is constructed and the combined weight based on both subjective and objective weights are obtained. Thirdly, an assessment model based on the combination of combined weights obtained before and TOPSIS method is established to realize the assessment of the flight training missions. Through a case analysis, the feasibility and effectiveness of the evaluation method are verified, which proves its certain engineering practice value.

Keywords: Flight Training; Evaluation; Sum of Squares of Deviations; Combined Weight; TOPSIS Method

0 引言

飞行训练任务是部队训练层级的训练构想与训练计划的中间产品, 是依据飞行训练管理者训练构想, 对训练进程和方法的具体设计^[1]。在此情况下, 飞行训练任务评估用于对多个训练任务进行分析^[2], 辅助训练管理者对任务进行优选排序, 对训练任务规划与资源管理具有极为重要的意义。

在现有的飞行训练研究中, 文献[3]和文献[4]涉及仿真系统的设计与实现, 为飞行训练质量检查、训练安全评估及事故征候调查提供了切实可行的办法, 提高了训练安全性和飞行训练效率。文献[5]针对飞行训练空域占用问题建立了飞行科目——空域占用过程的 TPPN 模型, 为飞行训练计划的自动优化编排提供了有效的技

术支持。文献[6]和文献[7]分别以西班牙空军学院和中国台湾空军学院训练教学飞机的选择问题为例, 基于模糊 AHP-TOPSIS 方法, 对可选的训练教学飞机进行评估排序, 为训练教学飞机的使用与采购提供决策支持。文献[8]运用熵权 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS) 法对场站飞行后勤保障计划进行优选, 缩短了保障计划的制定时间, 文献[9]建立了基于 AHP-ADC 法的飞行保障系统效能评估模型, 对飞行保障这一复杂系统的量化评估进行了探索。

综上所述, 对训练评估的研究主要涉及飞行训练安全、训练质量、训练装备、训练保障等方面, 缺乏对飞行训练计划制定中训练任务评估的研究。目前, 航空兵部队主要凭借经验与关键绩效评估指标对训练任务进行半定量评估, 这一方法可在小规模、低复杂度问题

作者简介: 李海明 (1986—), 男, 汉族, 北京人, 硕士研究生, 主要研究领域为优化与决策, 邮箱: lihaiming17@mails.ucas.ac.cn。

中快速得到最优解,适用于任务要求明确的专项飞行训练任务评估,然而在面对复杂多属性决策问题时,具有较大局限性,难以得到最优的评估结果。在评估方法方面,模糊 AHP-TOPSIS 法和 AHP-ADC 法过度依赖专家的主观经验,且没有充分利用数据信息,熵权 TOPSIS 法完全从数据出发对评估指标赋权,而未考虑其他因素,有时会得到与常理相悖的结论。

本文综合考虑评估指标的主、客观权重,提出了一种基于离差平方和最大化的评估模型,实现对飞行训练任务的系统评估。离差平方和加权基于统计分析方法,考虑了多属性综合评估值的离散程度,通过增大评估值的离散程度,提高任务间的评估区分度。TOPSIS

作为一种多属性决策方法^[10],可以综合处理多个相互制约的决策评估准则,实现对任务的量化评估。本文将基于离差平方和最大化的综合集成赋权法与 TOPSIS 法相结合,建立了基于离差平方和最大化的训练任务评估模型,实现对各训练任务的评估排序,使评估结果更加客观、合理,具有较强的工程应用价值。

1 飞行训练任务评估指标体系

从飞行训练的内涵和构成要素出发,参考文献[11]中的规则内容及训练专家意见,建立飞行训练任务评估指标体系,所建立的飞行训练任务评估指标体系如表 1 所示。

表 1 飞行训练任务评估指标体系

编号	指标名称	评分依据	说明
G ₁	装备维修进度	装(设)备使用时间(架次)/剩余时间	任务给装备保障计划进度带来的影响(成本型)
G ₂	气象条件	气象预测概率	气象条件决定训练任务的可行性(效益型)
G ₃	技术难度	训练专家评定	训练任务技术动作难度,由训练专家评定(效益型)
G ₄	战术难度	训练专家评定	训练任务战术动作难度,由训练专家评定(效益型)
G ₅	时间进度贡献率	飞行时间/阶段计划时间进度剩余	任务对阶段计划时间进度的影响(效益型)
G ₆	架次进度贡献率	飞行架次/阶段计划架次进度剩余	任务对阶段计划架次进度的影响(效益型)
G ₇	装备可靠性	参训装备的平均故障间隔时间	实施某训练任务时的装备可靠度(效益型)
G ₈	飞行员可靠性	训练专家评定	实施某训练任务时,飞行员的成功响应概率(效益型)

2 飞行训练任务评估模型

2.1 基于层次分析法的主观赋权法

层次分析法(AHP)是 Saaty 等于 20 世纪 70 年代提出的一种解决复杂决策问题的实用方法,应用步骤如下。

确定问题层次,构造成对比较矩阵。假设比较矩阵某一层 n 个因素 C_1, C_2, \dots, C_n 对上一层一个因素 G 的影响,每次取两个因素 C_i 和 C_j ,依据“1~9”标度进行两两比较,形成判断矩阵 A 。

计算权向量。根据矩阵 A 的最大特征值的特征向量作为权向量 w ,即:

$$Aw = \lambda w \quad (1)$$

对判断矩阵进行一致性检验,即:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

若 $CR < 0.1$,则通过一致性检验。若一致性检验不能通过,则需要重新构造成对比较矩阵或对矩阵 A 进行修正。 RI 值为随机一致性指标,可通过查表得到。 CI 值可通过公式(3)得到:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (3)$$

2.2 基于熵值法的客观赋权法

Shannon 将熵的概念引入信息论中,用于度量系统

的不确定程度。熵权法的基本原理:在任务多属性指标决策评估中,依据各指标的固有信息确定熵值。熵值越小,反映了信息的稳定性越高、效用值越大,可知指标的权重越大;熵值越大,反映了信息的稳定性越低、效用值越小,可知指标的权重越小^[12]。

2.2.1 数据预处理

设多属性决策问题有 n 个备选训练任务,有 m 个评估属性,根据实际情况可得到初始决策矩阵 $X = [x_{ij}]_{n \times m}$,其中, x_{ij} 表示第 i 个待评任务的第 j 个评估属性的观测值。

对决策矩阵进行归一化处理,对于效益型指标,有

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (4)$$

对于成本型指标,有

$$z_{ij} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (5)$$

其中, x_j^{\max} 为第 j 个属性的最大值, x_j^{\min} 为第 j 个属性的最小值。

经过上述归一化后的决策矩阵 $X = [x_{ij}]_{n \times m}$,转化为规范化决策矩阵 $Z = [z_{ij}]_{n \times m}$,各属性值范围为 $z_{ij} \in [0, 1]$ 。

2.2.2 计算评估属性熵值

设分别有 p_{ij} 、 k 为

$$p_{ij} = \frac{z_{ij}}{\sum_{i=1}^n z_{ij}} \quad (6)$$

$$k = \frac{1}{\ln n} \quad (7)$$

则第 j 个属性的熵值定义为:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n \ln(p_{ij}), \quad j=1,2,\dots,m \quad (8)$$

2.2.3 计算属性的加权系数

设各评估指标的变异程度系数为 $d_j = 1 - e_j$, 根据第 j 个评估指标的变异程度系数来确定各指标的熵权:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j}, \quad j=1,2,\dots,m \quad (9)$$

2.3 基于离差平方和最大化的综合集成赋权法

设有一多属性决策问题, 对 m 个属性有 l 种赋权方法, 其中, 第 q 种赋权方法给出的权向量值为:

$$W_q = (w_{1q}, w_{2q}, \dots, w_{mq})^T, \quad (10)$$

式中 $w_{iq} > 0$, $\sum_{j=1}^m w_{jq} = 1$, $q=1,2,\dots,l$, $i=1,2,\dots,n$.

设组合权重分块矩阵为 $W = (W_1, W_2, \dots, W_l)$, 组合系数向量为 $\Theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_l)^T$, 可形成如下组合权重矩阵:

$$W_c = W\Theta \quad (11)$$

$$Z_1 = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^m \sum_{h=1}^m (z_{i1} - z_{h1})(z_{i1} - z_{h1}) & \sum_{i=1}^m \sum_{h=1}^m (z_{i1} - z_{h1})(z_{i2} - z_{h2}) & \dots & \sum_{i=1}^m \sum_{h=1}^m (z_{i1} - z_{h1})(z_{in} - z_{hn}) \\ \sum_{i=1}^m \sum_{h=1}^m (z_{i2} - z_{h2})(z_{i1} - z_{h1}) & \sum_{i=1}^m \sum_{h=1}^m (z_{i2} - z_{h2})(z_{i2} - z_{h2}) & \dots & \sum_{i=1}^m \sum_{h=1}^m (z_{i2} - z_{h2})(z_{in} - z_{hn}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^m \sum_{h=1}^m (z_{in} - z_{hn})(z_{i1} - z_{h1}) & \sum_{i=1}^m \sum_{h=1}^m (z_{in} - z_{hn})(z_{i2} - z_{h2}) & \dots & \sum_{i=1}^m \sum_{h=1}^m (z_{in} - z_{hn})(z_{in} - z_{hn}) \end{pmatrix} \quad (17)$$

Z_1 为 m 阶对称方阵, 将目标函数按矩阵形式进一步表示, 并建立如下最优化问题:

$$\max F(\Theta) = W_c^T Z_1 W_c = \Theta^T W^T Z_1 W \Theta \quad (18)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \Theta^T \Theta = 1 \\ \Theta \geq 0 \end{cases}$$

可将该最优化问题简化为:

$$\max F_1(\Theta) = W_c^T Z_1 W_c = \Theta^T W^T Z_1 W \Theta / \Theta^T \Theta \quad (19)$$

由矩阵理论可知 $F_1(\Theta)$ 是线性表出系数向量的 Rayleigh 商. 由 Rayleigh 商的性质可知 $F_1(\Theta)$ 存在最大值.

设 λ_{\max} 为矩阵 $W_c^T Z_1 W$ 的最大特征根, Θ^* 为 λ_{\max} 所对应的单位特征向量. 则 F 的最大值为 λ_{\max} , Θ^* 为 W_c 的最优解, 即:

$$W_c^* = W\Theta^* \quad (20)$$

对 $W_c^* = (w_{c1}^*, w_{c2}^*, \dots, w_{cn}^*)^T$ 进行归一化处理可得

且满足单位化约束条件:

$$\Theta^T \Theta = 1 \quad (12)$$

由线性加权法可得决策矩阵 D 为:

$$D = ZW_c \quad (13)$$

在多属性决策评估中, 各属性权向量通过不同的主、客观赋权方法进行确定. 如果各权向量权系数选择不当, 致使各决策任务的多属性综合评估值互相差别很小, 这样将不利于决策排序^[13]. 因此, 权系数的选择需要考虑多属性综合评估值的离散程度, 离散程度越大, 综合评估值越分散, 任务间区分度越高.

本文采用基于离差平方和的方法确定组合权系数. 设有 $u_i(W_c)$ 为第 i 个评估任务与其他各任务综合评估值的离差平方和, 即:

$$u_i(W_c) = \sum_{j=1}^m [\sum_{h=1}^m (z_{ij} - z_{hj})w_{cj}]^2 \quad (14)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

为使综合评估值更加分散, 应使 n 个评估任务的离差平方和最大化, 可构造目标函数:

$$\max J(W_c) = \sum_{i=1}^n u_i(W) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [\sum_{h=1}^m (z_{ij} - z_{hj})w_{cj}]^2 \quad (15)$$

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{h_1=1}^m [\sum_{j_1=1}^m \sum_{j_2=1}^m (z_{ij_1} - z_{h_1j_1})(z_{ij_2} - z_{h_1j_2})]w_{cj_1}w_{cj_2} \quad (16)$$

矩阵 Z_1 为:

W_c^{**} , 其中:

$$w_{cj}^{**} = \frac{w_{cj}^*}{\sum_{j=1}^n w_{cj}^*}, \quad j=1,2,\dots,n \quad (21)$$

2.4 加权欧氏距离 TOPSIS 法

逼近理想解排序法是多属性决策问题的一种常用方法. 其核心思想为确定一个正、负理想解, 并找到与正理想解距离更小, 与负理想解的距离更大的解. 本文将基于离差平方和最大化的综合集成赋权法与 TOPSIS 法结合, 构建基于离差平方和最大化的飞行训练任务评估模型. 模型构建步骤如下:

步骤 1 建立初始决策矩阵.

构建初始评估矩阵 $H = (h_{ij})_{m \times n}$, h_{ij} 为第 n 个评估任务的第 m 个属性 ($i=1,2,\dots,n$; $j=1,2,\dots,m$).

$$H = (h_{ij})_{m \times n} = \begin{pmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ h_{n1} & \cdots & h_{nm} \end{pmatrix} \quad (22)$$

步骤2 建立标准化决策矩阵。

按式(4)和式(5)对矩阵H中的属性序列进行归一化处理,消除不同属性之间的量纲和数量级的影响。归一化后可得标准化决策矩阵 $Y = (y_{ij})_{m \times n}$ 。

步骤3 建立加权标准化决策矩阵。

通过式(21)得到的组合权重矩阵 W_c^{**} ,并对标准化决策矩阵Y进行加权,使矩阵Y右乘以 W_c^{**} ,得到加权标准化评估矩阵:

$$R = YW_c^{**} = (r_{ij})_{m \times n} = \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{pmatrix} \quad (23)$$

步骤4 计算各评估任务相对贴近度。

确定加权标准化决策矩阵R的各评估属性下的最大和最小值,分别记为正理想解 S^+ 与负理想解 S^- 。

$$S^+ = (r_1^+, r_2^+, \dots, r_m^+);$$

$$r_j^+ = \max_i \{r_{ij}\}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (24)$$

$$S^- = (r_1^-, r_2^-, \dots, r_m^-);$$

$$r_j^- = \min_i \{r_{ij}\}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (25)$$

分别计算各评估任务到正、负理想解的 Euclid 距离 d_i^+ , d_i^- :

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (r_{ij} - r_j^+)^2} \quad (26)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (r_{ij} - r_j^-)^2} \quad (27)$$

计算各评估对象的相对贴近度:

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (28)$$

C_i 的值越贴近 1,表示该评估任务越接近最优的水平;越接近 0,则表示越接近最劣水平。

步骤5 训练任务排序。

根据相对贴近度 C_i 的大小对训练任务进行排序,值越大训练任务越优。

3 结果与讨论

3.1 航空兵飞行训练任务评估

假设某部队阶段飞行训练任务目标为飞行时间 50 小时,飞行架次为 90 次。某型飞机飞行训练任务各项指标数据如表 2 所示。其中 G_1 为成本型指标,其余为效益型指标。

3.2 评估排序求解

现运用分别用层次分析法和熵权法得到训练评估

指标的主、客观权重,然后运用基于离差平方和最大化的综合集成赋权法得到组合权重,如图 1 所示。

表 2 某型飞机训练任务各项指标数据

训练任务	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	G_7	G_8
A_1	0.025	0.65	85	90	0.1	0.011	0.944	0.887
A_2	0.035	0.9	99	75	0.14	0.011	0.922	0.801
A_3	0.0305	0.6	87	85	0.122	0.011	0.935	0.854
A_4	0.027	0.7	97	75	0.108	0.011	0.876	0.797
A_5	0.01	0.85	80	87	0.04	0.011	0.944	0.881
A_6	0.011	0.8	80	89	0.044	0.022	0.912	0.853
A_7	0.015	0.86	95	92	0.06	0.033	0.913	0.837
A_8	0.02	0.82	85	93	0.08	0.022	0.933	0.821
A_9	0.0025	0.9	70	97	0.01	0.033	0.912	0.822
A_{10}	0.0025	0.9	70	90	0.01	0.033	0.917	0.91
A_{11}	0.005	0.9	70	97	0.02	0.067	0.912	0.822
A_{12}	0.005	0.9	70	90	0.02	0.067	0.917	0.91

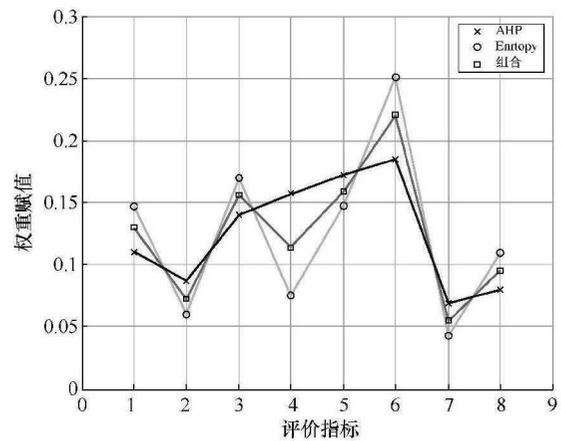


图 1 权重分析图

各属性的三类权重数值如表 3 所示。

表 3 评估指标权重

	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	G_7	G_8
AHP	0.109	0.866	0.140	0.157	0.172	0.185	0.06	0.08
熵权	0.147	0.059	0.169	0.074	0.147	0.250	0.04	0.10
组合	0.129	0.072	0.156	0.112	0.158	0.220	0.05	0.09

根据表 3 的构建决策矩阵,按式(4)和式(5)对矩阵进行标准化,根据式(23)构造主、客观组合加权标准化决策矩阵,并通过式(24)和式(25)确定正负理想解,所得计算结果如表 4 所示。

表 4 正负理想解取值

	G_1	G_2	G_3	G_4
S^+	0.0003	0.0593	0.1690	0.0742
S^-	0.1465	0.0001	0.0003	0.0001
	G_5	G_6	G_7	G_8
S^+	0.1465	0.2499	0.0423	0.1083
S^-	0.0003	0.0005	0.0001	0.0002

根据各训练任务到正、负理想解的 Euclid 距离,

按式 (28) 计算得到各任务相对贴进度, 结果如表 5 所示。

表 5 训练任务的相对贴进度及排序

训练任务	d_i^+	d_i^-	C_i
A_1	0.2631	0.1860	0.4142
A_2	0.2932	0.2355	0.4454
A_3	0.2759	0.1849	0.4012
A_4	0.2931	0.1913	0.3949
A_5	0.2781	0.1711	0.3809
A_6	0.2469	0.1612	0.3950
A_7	0.1864	0.2212	0.5427
A_8	0.2300	0.1811	0.4405
A_9	0.2347	0.2893	0.5521
A_{10}	0.2252	0.2928	0.5653
A_{11}	0.2269	0.2852	0.5570
A_{12}	0.2171	0.2888	0.5709

基于不同权重的相对贴进度对比如图 2 所示。

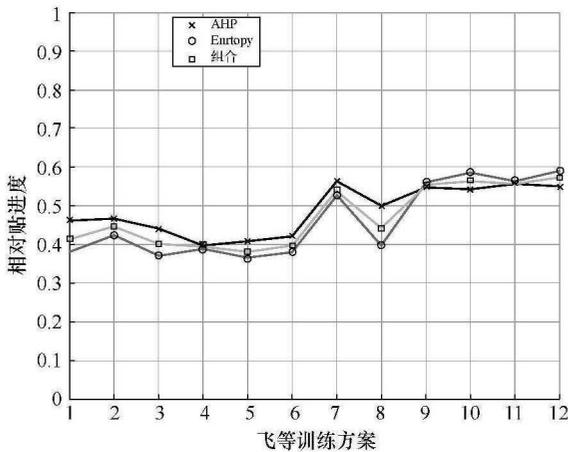


图 2 基于不同权重的相对贴进度对比

3.3 讨论

由表 3 可以发现, 在运用基于离差平方和最大化的综合赋权法得到的组合权重中, 各指标主观权重的平均调整幅度为 2.16%, 客观权重平均调整幅度为 1.86%, 可知组合权重值整体更偏向客观权重。

基于相对贴进度的评估排序结果如表 6 所示。

表 6 基于相对贴进度的评估排序结果

权重	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
AHP	A_7	A_{11}	A_{12}	A_9	A_{10}	A_8
熵权	A_{12}	A_{10}	A_{11}	A_9	A_7	A_2
组合	A_{12}	A_{10}	A_{11}	A_9	A_7	A_2
权重	7th	8th	9th	10th	11th	12th
AHP	A_2	A_1	A_3	A_6	A_5	A_4
熵权	A_8	A_4	A_6	A_1	A_3	A_5
组合	A_8	A_1	A_3	A_6	A_4	A_5

对该排序结果进行分析, 可知基于客观与组合权重的评估排序结果中, 前 7 位均一致, 不同的是在第 8 位至第 11 位中, 基于客观权重的评估结果为 $A_4 > A_6 > A_1 > A_3$, 基于组合权重的评估结果为 $A_1 > A_3 > A_6 > A_4$, A_1 在训练安全性方面的评分高于 A_4 , 结合训练实际情况可知, $A_1 > A_4$ 更合理; A_3 相比 A_6 , 指标 G_1 中装备保障成本较高, 约为 3:1, 指标 G_5 中贡献率较高, 约为 3:1, 而基于离差平方和的组合权重与熵权法相比, G_1 权重降低了 1.73%, G_5 的权重提高了 1.16%, 这一排序虽然会给装备保障工作增加负担, 但有助于完成阶段训练进度, 因此 $A_3 > A_6$ 更合理。

在基于主观权重的评估排序中, A_7 位于首位; 在基于组合权重的评估排序中, A_{12} 位于首位, 表明基于主观权重的评估排序倾向于选择长航时的训练任务。而基于组合权重的排序倾向于选择架次进度贡献率更高的训练任务, 由本阶段训练任务目标可知, 训练架次为 90 次, 数量较多, 为本阶段飞行训练的重点, 因此将架次进度贡献率更高的任务 A_{12} 、 A_{10} 、 A_{11} 、 A_9 排在首位更为合理。

4 结束语

本文针对飞行训练任务评估这一问题, 构建了飞行训练任务评估指标体系; 采用离差平方和最大化的方法对训练评估指标的主、客观权重进行组合; 结合 TOPSIS 法构建飞行训练任务评估模型, 计算得到各飞行训练任务的相对贴进度并将其作为评估值, 实现对训练任务的量化评估与优选。通过案例分析发现, 运用该评估方法得到的组合权重中各指标主观权重的平均调整幅度为 2.16%, 客观权重的平均调整幅度为 1.86%, 可知组合权重值整体更偏向客观权重, 且使得训练任务评估中基于组合权重和基于熵权法的客观权重评估排序的前 7 名保持一致。该评估模型实时性强且操作简单, 在军事训练评估领域中具有较强的工程应用价值。

参考文献

- [1] 杨佐, 刘海生. 空军飞行训练管理学[M]. 北京: 蓝天出版社, 2005.
- [2] Air Force Instruction 10-401, Air Force Operations Planning and Execution [EB/OL]. [2006-04-25]. https://static.e-publishing.af.mil/production/1/af_a3_5/publication/afi10-401/afi10-401.pdf.
- [3] 程斌, 刘峥, 杨林. 基于视景仿真技术的飞行训练过程仿真再现方法研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(S1): 379-382.
- [4] 夏正洪, 朱晓波, 罗超. 通航飞行训练教学辅助系统的研究与实现[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(3): 172-176.
- [5] 王里付, 朱新平. 基于 Petri 网和遗传算法的飞行训练计划优化编排[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2012, 34(2).
- [6] Sánchez-Lozano J M, Serna J, Dolón-Payán A. Evaluating military training aircrafts through the combination of multi-criteria decision making processes with fuzzy logic. A case study in the Spanish Air Force

- Academy[J]. Aerospace Science and Technology, 2015(42): 58-65.
- [7] Wang T C, Chang T H. Application of TOPSIS in evaluating initial training aircraft under a fuzzy environment[J]. Expert Systems with Applications, 2007(33): 870-880.
- [8] 田丰, 邢清华, 廖玉忠. 基于熵权 TOPSIS 的场站飞行后勤保障计划优选[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(12): 11-13.
- [9] 侯立峰, 熊哲, 盛景军. 基于 ADC 方法的飞行保障系统效能评估模型[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(10): 123-126.
- [10] Zavadskas E K, Mardani A, Turskis Z, et al. Development of TOPSIS Method to Solve Complicated Decision-Making Problems — An Overview on Developments from 2000 to 2015[J]. International Journal of Information Technology & Decision Making, 2016, 15(3): 645-682.
- [11] 秦前付, 徐沈, 马玉凯. 飞行训练计划的智能生成方法[J]. 系统工程理论与实践, 2003(8): 105-109.
- [12] 陈汗龙, 吴晓朝, 赵明洋, 等. 基于 TOPSIS 算法的防空通信网络系统效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(7): 140-143.
- [13] 陈伟, 夏建华. 综合主、客观权重信息的最优组合赋权方法[J]. 数学的实践与认识, 2007, 37(1): 17-22.