

基于可拓TOPSIS和集对分析的飞行程序评价模型

冉祥来

上海机场(集团)有限公司, 上海

收稿日期: 2024年6月9日; 录用日期: 2024年7月9日; 发布日期: 2024年7月18日

摘要

飞行程序设计的优劣将决定终端区的飞行安全和效率, 故其评估至关重要。本文从安全性、经济性、管制员指挥复杂性、环境影响等方面出发, 建立了飞行程序的评价指标体系。鉴于部分指标的数据采集技术难、可靠性低和成本高等缺陷, 指标类型涉及确定、区间、语言和随机型等, 针对既有评价方法无法较好处理部分指标的确定和不确定性, 以及指标之间的矛盾、冲突、对立问题, 通过融合集对分析、可拓物元理论和TOPSIS方法, 构建了考虑混合指标的可拓TOPSIS和集对分析评价模型, 将全部指标类型转化为联系数, 在计算各个飞行程序物元与正负理想程序物元的可拓联系数距离基础上, 得到了各个飞行程序物元的联系数贴近度。最后, 以某机场的飞行程序设计为例, 分析了不同联系数取值范围对多个飞行程序的优劣排序影响, 并与传统模型进行对比分析, 从而验证了模型的合理性和有效性。

关键词

航空运输, 飞行程序评估, 可拓TOPSIS, 集对分析

Flight Program Evaluation Model Based on Extension TOPSIS and Set Pair Analysis

Xianglai Ran

Shanghai Airport Group Co., Ltd., Shanghai

Received: Jun. 9th, 2024; accepted: Jul. 9th, 2024; published: Jul. 18th, 2024

Abstract

The quality of flight program design directly affects the flight safety, efficiency and capacity of the terminal area, so the evaluation of flight program is very important. In this paper, the evaluation

index system of flight procedures is established from the aspects of safety, economy, complexity of controller command and environmental impact. In view of the difficulties in data acquisition technology, low reliability and high cost of some indicators, the type of indicators involves determination, interval, language and random variables. Aiming at the problems that the existing evaluation methods can not deal with the determination and uncertainty of some indexes well, as well as the contradictions, conflicts and opposites among indexes, by integrating set pair analysis, extension matter element theory and TOPSIS method, the evaluation models of extension TOPSIS and set pair analysis considering mixed indexes are constructed. In this method, all index types were converted into relation numbers. On the basis of calculating the extended relation number distance between the matter elements of each flight program and the matter elements of positive and negative ideal programs, the relation number closeness degree of each flight program was obtained. Finally, taking the flight program design of an airport as an example, this paper analyzes the influence of different connection number value range on the sequencing of multiple flight programs, and compares it with the traditional model, so as to verify the rationality and effectiveness of the model.

Keywords

Air Transport, Flight Procedure Assessment, Extension TOPSIS, Set Pair Analysis

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

飞行程序是为航空器运行规划设计的“空中高速公路”，其优劣直接影响到航空器的飞行安全和效率，对机场建设、空域规划和管制指挥有着重要的影响。影响飞行程序设计的影响因素众多并且相互矛盾冲突，人工费时费力编制的飞行程序很难综合考虑全部情形，部分学者从运筹优化角度生成典型场景的最优飞行程序方案，其模型构建过程异常复杂并且很难求解，即使求解的方案也很难满足全部决策目标和约束条件，具有一定片面性[1] [2]。因此，根据空域运行实际，亟待寻求飞行程序的运行评价方法，对不同典型场景的若干个备选程序进行综合排序并推荐最佳方案，是保证飞行程序科学性、可行性的必要环节。

目前，飞行程序评价方面的研究成果较多，涉及指标筛选[3]-[5]、权重确定[6]、综合评价模型[7]-[9]等，按照研究内容可分类为：安全性评估[3]、噪声影响评估[4] [6]、经济性评估[5]及飞行程序综合评估[6] [7]方面，主要归纳如下：王超和孙岩[3]从超障安全和飞行冲突风险水平两方面分析了影响飞行程序安全性的主要因素；张召悦等[4]提出了基于航迹分段模型的飞行程序噪声评估方法；Nuic A [5]首次研究了精确化飞行程序的燃油消耗模型；Alam 等[6]对航空器执行连续下降进近程序过程中经济性、噪声影响及气体排放进行评估；陈肯[7]构建了PBN飞行程序设计方案的评价指标体系。目前，标准评价模型及其拓展涉及数百种，均有自己的优缺点，被应用在飞行程序评价上的主要包括基于区间数的多属性评价[7]、模糊综合评价法[8]以及多层次模糊综合评价[9]，部分学者通过融合两种及以上方法以提高其完美性，如：可拓 TOPSIS [10]、可拓集对分析[11]，现有文献较少涉及可拓物元法、TOPSIS 和集对分析三种方法的完美融合。由上可知，现有研究的不足主要如下：1) 不同文献建立的飞行程序评价指标存在差异，仍需要完善；2) 仅处理单一类型，未涉及处理包含确定性、区间、语言和随机不确定

特征等混合型指标；3) 忽略了指标的确定和不确定性，以及指标之间的矛盾、冲突、对立问题对飞行程序综合排名的影响。

综上所述，从安全性、经济性、管制员指挥复杂性、环境影响等方面出发，建立飞行程序的评价指标体系，在此基础上融合集对分析、可拓物元理论和 TOPSIS 方法，构建一种考虑混合指标类型的可拓 TOPSIS 和集对分析评价模型。该模型与传统评价方法相比，其优势在于将混合指标转化为联系数，据此刻画指标的确定和不确定性，通过引入各个飞行程序与正负理想程序的可拓联系数距离，各个飞行程序的评价结果综合考虑部分指标的确定和不确定性，同时又可以避免指标之间的矛盾、冲突、对立问题，评价结果相对客观、公平、公正。最后，以某机场的飞行程序设计为例，从而验证该模型的正确性与合理性。

2. 飞行程序评价指标体系构建

经过查阅相关文献[7]-[9]，并咨询相关专家的意见，本文从安全性、经济性、管制员指挥复杂性、环境影响以及飞行操作复杂性五个方面，遵循系统性、科学性、全面性、独立性等原则，建立了飞行程序评价指标体系，如表 1 所示。

Table 1. Evaluation index system

表 1. 评价指标体系

目标层	准则层	指标层
飞行程序评价	安全性 c_1	潜在的冲突点数量 c_{11}
		导航数据的精度 c_{12}
		一发失效应急程序 c_{13}
		障碍物高度及密度 c_{14}
	经济性 c_2	建设成本 c_{21}
		航空器的燃油消耗 c_{22}
		程序飞行时间 c_{23}
		航班正常率 c_{24}
		占用的空域 c_{25}
		最大飞行流量 c_{26}
	环境影响 c_3	尾气排放 c_{31}
		噪声 c_{32}
	飞行操作复杂性 c_4	速度调节复杂程度 c_{41}
		转弯调节复杂程度 c_{42}
		爬升下降调节复杂程度 c_{43}
		侧滑防止复杂程度 c_{44}
	管制员指挥复杂性 c_5	管制指令数量 c_{51}
		监控时间 c_{52}
		指挥的飞机架次 c_{53}
		指挥难易程度的感性认识 c_{54}

3. 可拓 TOPSIS 和集对分析评估模型的建立

可拓物元法是研究物元关系与可拓性及物元转换规律的一种方法,可定性和定量研究处理矛盾问题,为决策提供依据[12]。集对分析是一种处理不确定性问题的系统分析方法[13],通过联系数对问题的不确定性做定量分析及描述。TOPSIS 法又称为逼近于理想值的排序方法,是由 Hwang 等人提出的一种适用于多指标、对多个评价对象进行比较的方法[14]。通过以上三种方法的融合可有效解决现有飞行程序评估模型的不足,目前已有以上三种评价方法两两融合模型[13]-[16],但还没有三种方法融合模型。

3.1. 基本概念

3.1.1. 二元联系数的基本概念

定义 1 二元联系数: 设 R 为实数域, 若 $u = A + Bi$, 其中 $A, B \in R, i \in [0, 1]$, 称 $u = A + Bi$ 为二元联系数。

定义 2 二元联系数的运算法则: 以两个二元联系数 $u_1 = A_1 + B_1 \cdot i$ 和 $u_2 = A_2 + B_2 \cdot i$ 为例, u_1 和 u_2 的加、减、乘、除四则运算法则定义如下:

1) 加法运算: 设 $u = u_1 + u_2 = A_1 + B_1 \cdot i + A_2 + B_2 \cdot i = A + B \cdot i$, 其中 $A = A_1 + A_2, B = B_1 + B_2$ 。

2) 减法运算: 设 $u = u_1 - u_2 = A_1 + B_1 \cdot i - (A_2 + B_2 \cdot i) = A + B \cdot i$, 其中 $A = A_1 - A_2, B = B_1 - B_2$ 。

3) 乘法运算: 设 $u = u_1 \cdot u_2 = (A_1 + B_1 \cdot i) \cdot (A_2 + B_2 \cdot i) = A + B \cdot i$, 其中 $A = A_1 \cdot A_2, B = A_1 \cdot B_2 + B_1 \cdot A_2 + B_1 \cdot B_2$ 。

4) 除法运算: 设 $u = \frac{u_1}{u_2} = \frac{A_1 + B_1 \cdot i}{A_2 + B_2 \cdot i} = A + B \cdot i$, 其中 $A = \frac{A_1}{A_2}, B = \frac{A_2 B_1 - A_1 B_2}{A_2(A_2 + B_2)}$ 。

定义 3 联系数距离: 设联系数 $u_1 = A_1 + B_1 \cdot i$ 和 $u_2 = A_2 + B_2 \cdot i$, 规定 u_1 和 u_2 的联系数距离为:
 $L(u_1, u_2) = |A_2 - (A_1 + B_1)| + (|A_2 + B_2 - A_1| - |A_2 - (A_1 + B_1)|)i$ 。其物理意义如图 1 所示。其中,
 $d_{\min} = |A_2 - (A_1 + B_1)|, d_{\max} = |A_2 + B_2 - A_1|$ 。

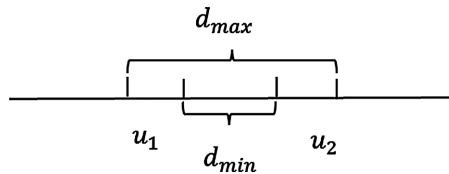


Figure 1. Connection number distance
 图 1. 联系数距离

3.1.2. 基于联系数的可拓物元概念

给定事物的名称 M , 其特征 c 的量值为 v , 令有序三元组 $R(M, c, v)$ 表示事物的基本元, 简称物元[14]。令事物 M 有 n 个特征值 c_1, c_2, \dots, c_n 和相应的量值 v_1, v_2, \dots, v_n , 称 R 为 n 维物元, 简记为 $R(M, c, v)$ 。若 m 个事物的 n 维物元组合在一起, 成为复合物元, 记做 R_{mn} 。如果将 R_{mn} 中的量值用联系数表示就得到了基于联系数的可拓物元, 记作 R'_{mn} :

$$R'_{mn} = \begin{bmatrix} & c_1 & \cdots & c_n \\ M_1 & u_{11} & \cdots & u_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_m & u_{m1} & \cdots & u_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 M_i 表示第 i 个事物 ($i = 1, 2, \dots, m$), c_j 表示第 j 项特征 ($j = 1, 2, \dots, n$), u_{ij} 表示第 i 个事物第 j 项特征

对应的基于联系数的量值。

3.1.3. 混合指标与区间数之间的转化

集对分析理论可以同时处理客观事物之间的确定性与不确定性。若决策问题中属性指标包含区间型、正态随机分布、固定值和语言型等混合指标类型变量，可以将混合型指标转化为区间型数值，利用区间数刻画其确定性与不确定性，见表 2，并将区间数转化为联系数，利用集对分析中的联系数对其中的不确定性做定量分析及描述[15]。

Table 2. Mixed indicator variables converted into interval variables

表 2. 混合指标变量转化为区间数变量

类型	实际变量	区间数变量	备注
区间数	$X = [x^-, x^+]$	$X = [x^-, x^+]$	
正态随机变量	$\varepsilon = (\mu_x, \sigma_x)$	$X = [\mu_x - 3\sigma_x, \mu_x + 3\sigma_x]$	μ_x 和 σ_x 是均值和方差，准确率为 99%
固定值	$X = [x^-, x^+]$	$X = [x^-, x^+]$	$x^- = x^+$
语言类型	较差、差、一般、较好、好	[0, 0.2]、[0.2, 0.4]、[0.4, 0.6]、 [0.6, 0.8]、[0.8, 1]	

联系数转换公式：

$$u = \frac{x^+ + x^-}{2} + \frac{x^+ - x^-}{2}i = A + Bi, i \in [0, 1]。其中 x^- 和 x^+ 分别表示区间数 [x^-, x^+] 左边和右边的数值。$$

3.2. 飞行程序评价模型的计算步骤

m 个待评估飞行程序记为 M_1, M_2, \dots, M_m ，每个飞行程序均有 n 个评价指标 c_1, c_2, \dots, c_n (表 1)，其指标类型涉及语言类型、区间类型、固定值和随机变量等。通过集对分析理论，将混合指标的变量转化为一个联系数，基于联系数刻画其不确定性，据此建立基于可拓 TOPSIS 和集对分析的评价模型。具体步骤如下：

步骤一：获取飞行程序复合物元的原始数据。将待评价的飞行程序作为物元的事物，指标作为物元的特征，构造复合物元 P_{mn} 。

步骤二：计算基于联系数的飞行程序可拓物元。根据表 2 中联系数与区间数的转换公式，将复合物元 P_{mn} 转化为基于联系数的可拓物元 U_{mn} ：

$$U_{mn} = \begin{bmatrix} & c_1 & \cdots & c_n \\ M_1 & u_{11} & \cdots & u_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_m & u_{m1} & \cdots & u_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

步骤三：标准化。对第 k 个飞行程序物元的第 t 项特征对应的基于联系数的量值 $u_{kt} = A_{kt} + B_{kt} \cdot i$ 进行标准化处理，包括越大(小)越好的效益(成本)型指标，具体方法如下所示[16]：

当 u_{kt} 为效益型指标时，标准化公式为：

$$u'_{kt} = \frac{u_{kt}}{\min_k u_{kt}} = A'_{kt} + B'_{kt} \cdot i \quad (3)$$

当 u_{kt} 为成本型指标时，标准化公式为：

$$u'_{kt} = \frac{\min_k u_{kt}}{u_{kt}} = A'_{kt} + B'_{kt} \cdot i \quad (4)$$

其中 $k = 1, 2, \dots, m, t = 1, 2, \dots, n$ 。

步骤四：各指标权重的确定。

通过专家定权法获得 n 个指标的权重区间数 $\omega_t = [\omega_t^-, \omega_t^+]$ ($t = 1, 2, \dots, n$) 且满足 $\sum_{t=1}^n \omega_t^- \leq 1$, $\sum_{t=1}^n \omega_t^+ \geq 1$)，并将权重区间数转化为权重二元联系数，即 $w'_t = A'_t + B'_t \cdot i$ ($t = 1, 2, \dots, n$)。

步骤五：计算飞行程序的加权可拓物元矩阵以及理想物元。将基于联系数的可拓物元矩阵与各指标的权重相乘得到加权可拓物元矩阵：

$$U'' = \begin{bmatrix} & c_1 & \cdots & c_n \\ M_1 & u''_{11} & \cdots & u''_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_m & u''_{m1} & \cdots & u''_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中： $u''_{kt} = w'_t \cdot u'_{kt} = A''_{kt} + B''_{kt} \cdot i$ ($k = 1, 2, \dots, m; t = 1, 2, \dots, n$)。

由加权可拓物元矩阵可得正理想物元为：

$$U^+ = \begin{bmatrix} & c_1 & \cdots & c_n \\ M & U_1^+ & \cdots & U_n^+ \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 $U_t^+ = A_t^+ + B_t^+ \cdot i$, $A_t^+ = \max_{1 \leq k \leq m} A''_{kt}$; $B_t^+ = \max_{1 \leq k \leq m} B''_{kt}$ ($t = 1, 2, \dots, n$)。

负理想物元为：

$$U^- = \begin{bmatrix} & c_1 & \cdots & c_n \\ M & U_1^- & \cdots & U_n^- \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 $U_t^- = A_t^- + B_t^- \cdot i$, $A_t^- = \min_{1 \leq k \leq m} A''_{kt}$; $B_t^- = \min_{1 \leq k \leq m} B''_{kt}$ ($t = 1, 2, \dots, n$)。

步骤六：计算各飞行程序物元与理想物元之间的可拓距离。

各飞行程序物元与正理想物元的可拓距离为：

$$L_k^+ = \sum_{t=1}^n L(u''_{kt}, U_t^+) \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

各飞行程序物元与负理想物元的可拓距离为：

$$L_k^- = \sum_{t=1}^n L(u''_{kt}, U_t^-) \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (9)$$

步骤七：贴近度的计算及方案决策[17]。根据数学公式(10)，计算第 k 个飞行程序的相对贴近程度值 D_k ，其值在 0 与 1 之间，该值越接近于 1，表示飞行程序越优，即方案越接近理想解。根据各个飞行程序的相对贴近程度 D_k 的值对全部方案进行排序。

$$D_k = \frac{L_k^-}{L_k^+ + L_k^-} \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (10)$$

4. 案例分析

为了验证模型的有效性，以某机场的 4 个飞行程序评价为例，受限于部分指标的数据采集技术难或

数据质量不高, 部分指标类型涉及固定、区间、随机和语言等类型, 基本数据具体如表 3 所示。据此确定复合物元 P_{mn} 。将其转换为基于联系数的可拓物元 U_{mn} 后, 进行标准化, 得到可拓物元 U'_{mn} , 据此计算权重可拓物元 W'_i , 如表 4 所示。

在上述基础上求得正理想物元 U^+ 和负理想物元 U^- 后, 计算出各飞行程序与正负理想解之间的可拓距离和贴适度, 如表 5 所示。

Table 3. Flight procedure evaluation index and its value

表 3. 飞行程序评价指标及其取值

方案		M_1	M_2	M_3	M_4
c_1	c_{12}	7	9	8	8
	c_{12}	[0.93, 0.98]	[0.97, 0.99]	[0.91, 0.94]	[0.89, 0.94]
	c_{13}	2	1	1	2
	c_{14}	(840, 21)	(625, 12)	(622, 19)	(600, 10)
c_2	c_{21}	[1, 1.4]	[2, 2.3]	[3, 3.4]	[1.5, 1.8]
	c_{22}	[8.8, 9.4]	[5.9, 6.3]	[6.2, 7.4]	[7.9, 8.1]
	c_{23}	[6.9, 7.2]	[5.8, 6.2]	[9.5, 9.8]	[7.5, 8.6]
	c_{24}	[0.78, 0.81]	[0.74, 0.76]	[0.83, 0.85]	[0.79, 0.81]
	c_{25}	(0.4, 0.01)	(0.6, 0.012)	(0.5, 0.008)	(0.6, 0.01)
	c_{26}	[30, 36]	[27, 31]	[21, 23]	[25, 30]
c_3	c_{31}	(8.8, 0.5)	(6, 0.3)	(8.2, 0.4)	(7.9, 0.4)
	c_{32}	[0.1, 0.4]	[0.7, 1]	[0.4, 0.6]	[0.2, 0.5]
c_4	c_{41}	好	好	好	较好
	c_{42}	较好	差	较好	一般
	c_{43}	较好	差	差	一般
	c_{44}	好	较好	一般	好
c_5	c_{51}	[66, 71]	[42, 50]	[55, 63]	[51, 56]
	c_{52}	[8.7, 9.4]	[5.8, 6.2]	[7.7, 8.2]	[7.7, 8.4]
	c_{53}	(10, 0.3)	(6.9, 0.1)	(7.8, 0.2)	(6.2, 0.1)
	c_{54}	[0.8, 1]	[0.4, 0.6]	[0.4, 0.6]	[0.4, 0.6]

Table 4. Standardized extension matter element and weight extension matter element value

表 4. 标准化可拓物元及权重可拓物元取值

指标	W'_i	M_1	M_2	M_3	M_4
c_{12}	$0.041 + 0.007i$	$1 + 0i$	$0.7778 + 0i$	$0.875 + 0i$	$0.875 + 0i$
c_1	c_{12}	$1.0437 + 0.0157i$	$1.071 - 0.008i$	$1.0109 + 0.0053i$	$1 + 0.0162i$
	c_{13}	$0.038 + 0.006i$	$2 + 0i$	$1 + 0i$	$2 + 0i$
	c_{14}	$0.152 + 0.01i$	$0.6458 - 0.0268i$	$0.8411 - 0.0202i$	$1 + 0i$

续表

c_{21}	$0.03 + 0.008i$	$1 - 0.0357i$	$0.5581 + 0.0288i$	$0.375 + 0.0221i$	$0.7273 + 0.0227i$
c_{22}	$0.003 + 0.006i$	$0.6264 + 0.0119$	$1 - 0.0476i$	$0.9048 - 0.094i$	$0.7081 - 0.0104i$
c_{23}	$0.0545 + 0.0095i$	$0.8511 + 0.0031i$	$1 - 0.0081i$	$0.6218 + 0.0058i$	$0.7547 + 0.0045i$
c_{24}	$0.028 + 0.004i$	$1.06 + 0.0058i$	$1 + 0i$	$1.12 - 0.0016i$	$1.0667 - 0.0009i$
c_{25}	$0.031 + 0.003i$	$1 - 0.014i$	$0.6667 + 0i$	$0.8 + 0.0092i$	$0.6667 + 0.0063i$
c_{26}	$0.048 + 0.006i$	$1.5 + 0.0652i$	$1.3182 + 0.0296i$	$1 + 0i$	$1.25 + 0.0543i$
c_{31}	$0.018 + 0.003i$	$0.6818 - 0.0119i$	$1 + 0i$	$0.7317 + 0.0023i$	$0.7595 - 0.0013i$
c_{32}	$0.011 + 0.004i$	$1 + 0i$	$0.2941 + 0.1059i$	$0.7143 + 0.0857i$	$0.7143 + 0.0857i$
c_{41}	$0.02 + 0.002i$	$1.8 - 0.1333i$	$1.8 - 0.1333i$	$1.8 - 0.1333i$	$1 + 0i$
c_{42}	$0.044 + 0.006i$	$2.3333 - 0.3333i$	$1 + 0i$	$2.3333 - 0.3333i$	$1.6667 - 0.1667i$
c_{43}	$0.059 + 0.002i$	$2.3333 - 0.3333i$	$1 + 0i$	$1 + 0i$	$1.6667 - 0.1667i$
c_{44}	$0.077 + 0.012i$	$1.8 - 0.1333i$	$1.4 - 0.0667i$	$1 + 0i$	$1.8 - 0.1333i$
c_{51}	$0.048 + 0.004i$	$0.6934 + 0.0108i$	$0.8482 - 0.0149i$	$1 + 0i$	$0.8879 + 0.005i$
c_{52}	$0.095 + 0.004i$	$0.663 - 0.0034i$	$1 + 0i$	$0.7547 + 0.0014i$	$0.7453 - 0.0072i$
c_{53}	$0.05 + 0.003i$	$0.62 - 0.0237i$	$0.8986 + 0.0042i$	$0.7949 - 0.0211i$	$1 + 0i$
c_{54}	$0.065 + 0.003i$	$0.5556 + 0.0444i$	$1 + 0i$	$1 + 0i$	$1 + 0i$

Table 5. Calculation results of positive and negative extension distance and proximity degree of each flight program
表 5. 飞行程序方案的正负可拓距离与贴适度计算结果

	M_1	M_2	M_3	M_4
L_k^+	$0.2990 - 0.0697i$	$0.4171 - 0.1525i$	$0.4234 - 0.1517i$	$0.3223 - 0.1428i$
L_k^-	$0.3322 - 0.0848i$	$0.2172 - 0.1008i$	$0.2485 - 0.0519i$	$0.2946 - 0.1147i$
D	$0.5263 + 0.1189i$	$0.3425 + 0.2034i$	$0.3698 + 0.1552i$	$0.4776 + 0.2176i$

由上可知，各飞行程序的贴适度为二元联系数，鉴于二元联系数 $u = A + Bi$ 包含确定量 A 和不确定量 B 两部分，各个程序的排名随着 i 的变化可能发生变化，如图 2 所示，从中可知：1) 当 $i = 0$ 时，排名仅由确定部分决定，此时排名为 $M_1 \geq M_4 \geq M_3 \geq M_2$ ；2) 当 $0 < i \leq 1$ 时，随着 i 的增加，不确定部分对各个程序的影响程度逐步变大， $i = 0.4934$ 或 0.5664 是临界点，改变 M_1 和 M_4 、 M_2 和 M_3 的排名；3) 当 $i = 1$ 时，不确定部分对各个程序的影响程度最大，此时排名为 $M_4 \geq M_1 \geq M_2 \geq M_3$ 。

此外，将本模型与可拓评价、集对分析和 TOPSIS 进行对比，如图 3 所示，从中可知：四种模型的四种飞行程序排名不完全相同，排名前两位的均为 M_1 和 M_4 ，排名后两位的均为 M_2 和 M_3 ，导致这种结果的原因主要有：1) 集对分析方法虽然考虑了评价指标中的不确定性因素对评价结果的影响，但是没有考虑评价对象与理想化目标之间的差异程度，没有进行相对优劣的比较；2) 可拓评价法和 TOPSIS 法没有考虑评价指标中不确定性因素对评价结果的影响。因此，本文的评估模型综合上述三种评价方法的优点，所得出的结果更加客观、公平公正，从而证明了其有效性。

5. 结论

本文在构建飞行程序的评价指标体系基础上，针对既有评价方法无法较好处理混合指标类型，部分

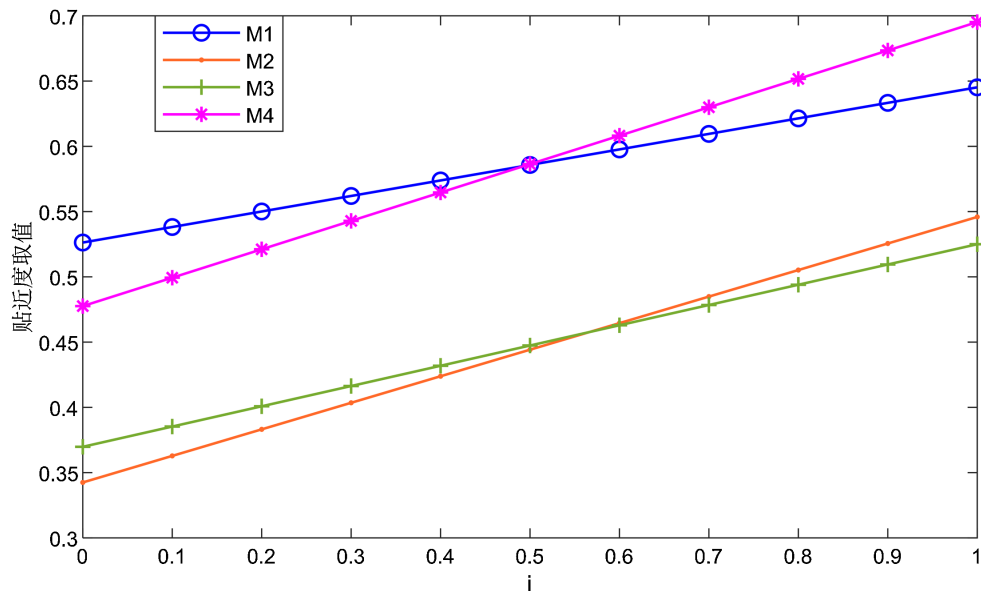


Figure 2. The influence of the change of connection degree i on the closeness and ranking of the flight program
图 2. 联系度 i 的变化对各飞程序的贴近度和排名的影响

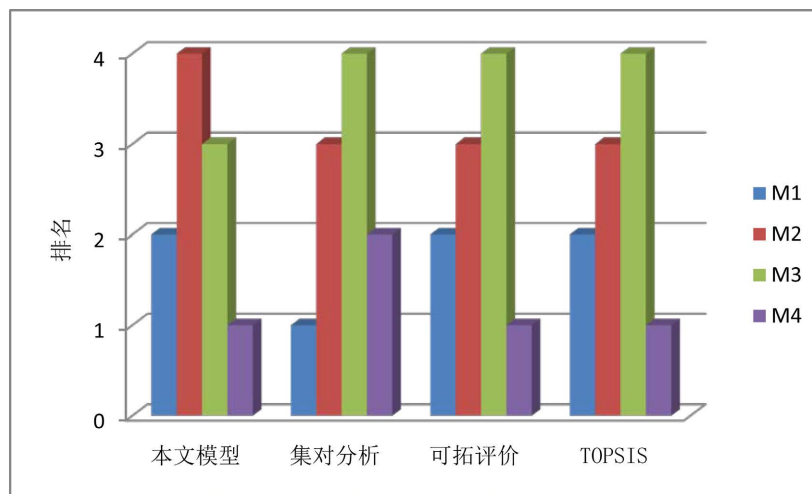


Figure 3. Comparison of results of four evaluation models
图 3. 四种评价模型的结果对比

指标的确定和不确定性，以及指标之间的矛盾、冲突、对立问题，构建了一种基于可拓 TOPSIS 和集对分析的混合指标评价模型。为了验证本文评价模型的有效性，以某机场的飞行程序设计为例，分析了不同联系数取值范围对多个飞行程序的优劣排序影响，并与传统模型进行对比分析。本文的评价结果相对客观、公平、公正，因而是可行的。

然而，本模型的不足在于仅考虑单决策者，鉴于单决策者的经验片面性，综合多个决策者的评价结果相对更加客观。因此，未来研究工作是将群决策与该评价模型进行融合，并将其应用在飞行程序评估中。

参考文献

- [1] 吕宗平, 陈雪蕊, 徐涛. 基于噪声最优航迹的飞行程序优化方法研究[J]. 计算机与数字工程, 2016, 44(8): 1458-1464.

-
- [2] 胡青云, 张飞桥, 周云帆. 飞行程序优化对端净空地形复杂机场容量的影响[J]. 航空计算技术, 2019, 49(4): 84-87.
- [3] 王超, 孙岩. 仪表飞行程序运行安全性评价模型与仿真分析[J]. 中国民航大学学报, 2011, 29(2): 5-8.
- [4] 张召悦, 王超, 孟娜, 等. 基于航迹分段的飞行程序噪声评估方法[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(3): 116-120.
- [5] Nuic, A. (2010) User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.10. Eurocontrol Report, Toulouse.
- [6] Alam, S., Nguyen, M.H., Abbass, H.A., Lokan, C., Ellejmi, M. and Kirby, S. (2010) A Dynamic Continuous Descent Approach Methodology for Low Noise and Emission. *29th Digital Avionics Systems Conference*, Salt Lake City, 3-7 October 2010, 1-18. <https://doi.org/10.1109/dasc.2010.5655502>
- [7] 陈肯. 不确定多属性决策在 PBN 飞行程序方案优选中的应用[J]. 交通运输系统工程与信息, 2012, 12(3): 154-158.
- [8] 赵向领, 李丽霞. 基于模糊方法的飞行程序评价[J]. 交通信息与安全, 2011, 29(5): 20-24.
- [9] Chen, K. and Yan, Q. (2009) Application of Fuzzy—AHP Method to Optimal Selection of FPDS. *International Conference on Transportation Engineering 2009*, Chengdu, 25-27 July 2009, 2454-2462. [https://doi.org/10.1061/41039\(345\)406](https://doi.org/10.1061/41039(345)406)
- [10] Tian, J.S. (2019) Efficiency of High-Standard Farmland Development Based on Matter-Element Extension and Topsis Modeling. *Applied Ecology and Environmental Research*, **17**, 11303-11316. https://doi.org/10.15666/aeer/1705_1130311316
- [11] Wan, X., Yang, T., Zhang, Q., Yan, X., Hu, C., Sun, L., *et al.* (2021) A Novel Comprehensive Model of Set Pair Analysis with Extenics for River Health Evaluation and Prediction of Semi-Arid Basin—A Case Study of Wei River Basin, China. *Science of the Total Environment*, **775**, Article 145845. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145845>
- [12] 王志伟, 刘曙光, 许健. 基于物元可拓法的轨道交通 PPP 项目风险评价研究[J]. 数学的实践与认识, 2021, 51(3): 15-25.
- [13] 刁莉娟, 姚建, 艾怡凝. 基于 SPA-TOPSIS 耦合的工业绿色发展综合评价[J]. 生态经济, 2020, 36(9): 54-57.
- [14] 范德成, 蔡文科. 中部六省高技术产业创新驱动绩效分析——基于熵值和 TOPSIS 法物元评判模型[J]. 工业技术经济, 2016, 35(10): 109-116.
- [15] 钱勇, 马健霄, 赵颀, 等. 基于集对可拓物元模型的公路隧道运营环境安全评价方法[J]. 森林工程, 2020, 36(1): 87-95.
- [16] Sun, B., Wei, M. and Zhu, S. (2019) A Hybrid-Type Indicator Set Pairs Analysis Model for Evaluating Transit Operational Efficiency. *Journal of Nonlinear and Convex Analysis*, **20**, 893-904.
- [17] 申毅荣, 解建仓. 基于熵权和 TOPSIS 法的水安全模糊物元评价模型研究及其应用[J]. 系统工程, 2014, 32(7): 143-148.