

综合评价飞行模拟器的一种方法

官建成 屈世菊

(北京航空航天大学, 北京, 100083)

摘 要 采用多目标决策理论, 根据层次分析法的基本原理, 建立了一个多层次的飞行模拟器的综合评价模型。该模型以飞行员的评定和意见作为主要依据, 采取两两比较的方式, 可对飞行模拟器的逼真度和有效性进行综合评价。该方法对于改进飞行模拟器的逼真度、提高飞行模拟器的模拟有效性有实用意义。

关键词 模拟器 层次分析法 综合评价

引 言

飞行模拟器的模拟逼真度和模拟有效性是飞行器模拟界普遍关心的一个非常重要的问题, 飞行员的评定和意见又是改进飞行模拟器的逼真度和有效性的主要依据^[1]。因此, 如何正确评价飞行模拟器的逼真度和有效性, 在很大程度上取决于飞行员的经验判断和对飞行的深刻理解, 也为飞行模拟器的试验者和用户最关心的问题。

对飞行模拟器的模拟逼真度和模拟有效性的综合评价是个复杂的多目标决策问题, 这主要是因为: (1) 该综合评价问题涉及的评价因素众多, 是一个多层次、多因素的评价问题^[1]; (2) 评价因素主要由飞行员的评定和意见组成, 其中许多评价因素无法直接定量评价。

参考文献 [1] 归纳了飞行员对飞行模拟器有效性评定的主要因素, 并对各种因素评定标准进行了有益的定性描述, 这无疑对于深入开展该领域的研究奠定了良好的基础。但如何将飞行员对飞行模拟器逼真度和有效性的评价这一弱结构化(不能完全定量描述)的多指标决策问题定量描述出来则值得我们作进一步研究。

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, 简写 AHP) 是美国著名运筹学家、匹兹堡大学教授 T. L. Saaty 于 70 年代中期提出的。它将复杂的多目标决策问题分解为各个组成因素, 将这些因素按支配关系分组形成有序的递阶层次结构, 通过两两比较的方式确定本层次中诸因素的相对重要性, 然后综合人的判断, 以决定评定因素相对重要性的总的顺序, 从而达到将一个弱结构化甚至非结构化的多指标 (目标) 决策问题转化为一个定量决策问题。

现实生活中许多决策问题、评价问题都有大量因素无法定量描述, 需要加入人的主

1993年8月26日收到初稿, 1994年6月3日收到修改稿。

观判断, 决策的最后结果往往难以用现成的数学模型描述出来, 而是取决于少数几个专家对决策或评价问题的洞悉程度。而 AHP 方法恰恰体现了人的决策思维的这些基本特征, 即将复杂问题分解, 加上人的判断, 最后进行综合。由于 AHP 方法具有广泛的应用背景和深奥的数学原理作理论基础, 加上方法本身简单灵活, 应用方便。因此, 近年来, AHP 方法在我国也得到了普通的应用, 如飞机选型问题^[2]、新产品开发问题^[3]、乃至一些大规模的战略决策问题等^[4], 其应用范围几乎遍及各个研究领域。对于飞行模拟器的逼真度和有效性的综合评价问题, 由于飞行员的评定意见是最具有权威性的, 而飞行员的评定意见大多是依据他们的经验和主观判断。所以, 这就使得我们有可能采用 AHP 方法对此类问题进行探索。

1 AHP 方法简介

运用 AHP 方法解决问题, 必须首先对所研究的问题有清楚的认识, 分析问题所包含的因素及相互关系。在此基础上, 按以下步骤进行^[3,4,5]:

1.1 建立递阶层次结构

这是 AHP 方法中最重要的一步。将复杂问题分解为不同的元素, 把这些元素按属性不同分成若干组, 以形成不同层次。处在最上层的通常只有一个元素, 一般是问题的预定目标, 它往往较为笼统 (例如飞行模拟器的逼真度和有效性评价问题)。同一层次的元素作为准则, 对下一层次的某些元素起支配作用, 同时它亦受上一层次元素的支配。下一层次元素往往是上一层次准则的细化, 因此更为具体也更便于量化。最低一层为方案层, 包括所有待选的方案 (例如, 几种模拟器比较时, 可将不同模拟器作为不同方案)。这样从上至下的支配关系就形成了一个递阶层次结构, 如图 1 所示。

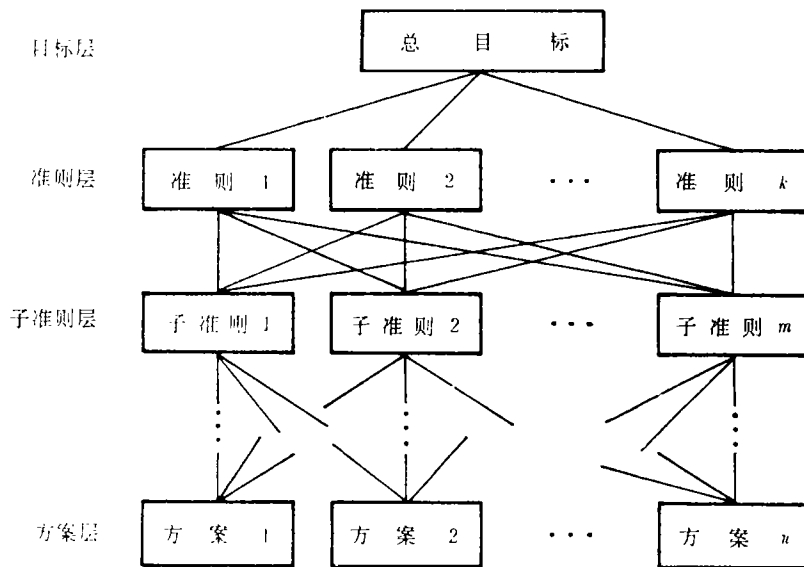


图 1 递阶层次结构图

1.2 构造两两比较判断矩阵

在每一层次, 针对上一层次某个准则(元素), 对该层次的元素进行两两比较, 根据所比较的两元素相对于该准则的重要程度, 按表1所示的标度含义, 以形成判断矩阵。

表1 标度的含义

标 度	含 义
1	表示两个元素比较, 具有相同重要性
3	一个元素比另一元素稍微重要
5	一个元素比另一元素较强重要
7	一个元素比另一元素强烈重要
9	一个元素比另一元素绝对重要
2, 4, 6, 8	两相邻判断的中值
倒 数	若元素 A_i 与 A_j 比较得到判断值 a_{ij} , 则 A_j 与 A_i 相比较得 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

显然, 若对上一层次某元素 A_k 来讲, 下一层次中 B_1, B_2, \dots, B_n 受其支配, 则判断矩阵 $(B_1, B_2, \dots, B_n$ 相对于 $A_k)$ 可用矩阵 A 来描述:

$$A = (a_{ij})_{n \times n} \quad (1)$$

其中:

$$a_{ij} > 0, a_{ij} = 1/a_{ji}, a_{ii} = 1$$

1.3 对单一准则下的各元素进行单排序

计算在上一层次某元素(如 A_k)支配下, 本层次各要素(如 B_1, B_2, \dots, B_n)相对于 A_k 的权重, 即计算本层次各判断矩阵的最大特征根对应的特征向量。例如设在 A_k 下, 对 B_1, B_2, \dots, B_n 通过两两比较得判断矩阵 A , 则求解:

$$AW = \lambda_{\max} W \quad (2)$$

其中 λ_{\max} 为矩阵 A 的最大特征根, W 为相应的特征向量。将 W 正规化后, 即可将 W 作为元素 B_1, B_2, \dots, B_n 在准则 A_k 下的排序权向量。

在某些场合下, 由于人的主观判断有误, 会出现有悖于事实的判断。因此在求得 λ_{\max} 后, 尚须进行一致性检验, 其步骤为^{[5][6]}:

a. 计算一致性指标 C.I.

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

其中 n 为判断矩阵的阶数。

- b. 查表求平均随机一致性指标^[5] $R.I.$ 。
c. 计算一致性比例 $C.R.$ 。

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \quad (4)$$

当 $C.R. < 0.1$, 则认为满足一致性检验, 否则, 还须进行多轮专家(如飞行员)咨询、调查, 以调整判断矩阵。

1.4 对总目标下各层元素进行总排序

求出递阶层次结构中每一层次中所有元素相对于总目标的相对权重, 并进行总的判断一致性检验。这一步骤从第二层次开始沿递阶层次逐层向下计算。最下层元素的组合相对权重即为各决策方案的优先排序顺序。

设 $b_j^k = (b_{1j}^k, b_{2j}^k, \dots, b_{mj}^k)^T$, 其中 n 为第 k 层的元素数目。 b_j^k 是第 k 层所有元素在第 $k-1$ 层(即上一层)第 j 个元素作为准则下的排序权向量, 而其中不受支配的元素权重为零。

令矩阵:

$$B_k = (b_1^k, b_2^k, \dots, b_m^k)_{n \times m}$$

为第 k 层相对于上一层的优先权矩阵, 其中 m 为第 $k-1$ 层指标(元素)的个数。则第 k 层 n 个元素相对于总目标的组合排序权重 W_k 为:

$$W_k = B_k W_{k-1} = \dots = B_k B_{k-1} \dots B_3 W_2 \quad (5)$$

式中:

W_2 ——第二层元素相对于总体目标的排序向量;

k ——第 k 层次, $3 \leq k \leq L$;

L ——层数。

类似地, 可逐层进行递阶层次组合判断的一致性检验^[6]。

2 飞行模拟器综合评价模型

在参考文献[1]的归纳、总结的基础上, 我们将飞行员对模拟器逼真度和有效性的评定用图2所示的递阶层次结构来描述。

由图2显见, 该模型结构为一个非完全的递阶层次结构^[6], 共有4层。第一层是总体目标, 表示对飞行模拟器的逼真度和有效性的综合评价, 是一个笼统概念。第2层可视作总目标的各子目标, 它比总目标要具体。第3层又可视作是子目标的分准则, 它比子目标更为细化。最低一层(在本例中为第4层)为方案层, 它可以表示模拟器的不同设计方案或修改方案, 亦可表示不同类型的飞行模拟器。

由上分析可知, 该递阶层次结构的构成符合层次分析法的基本原理。

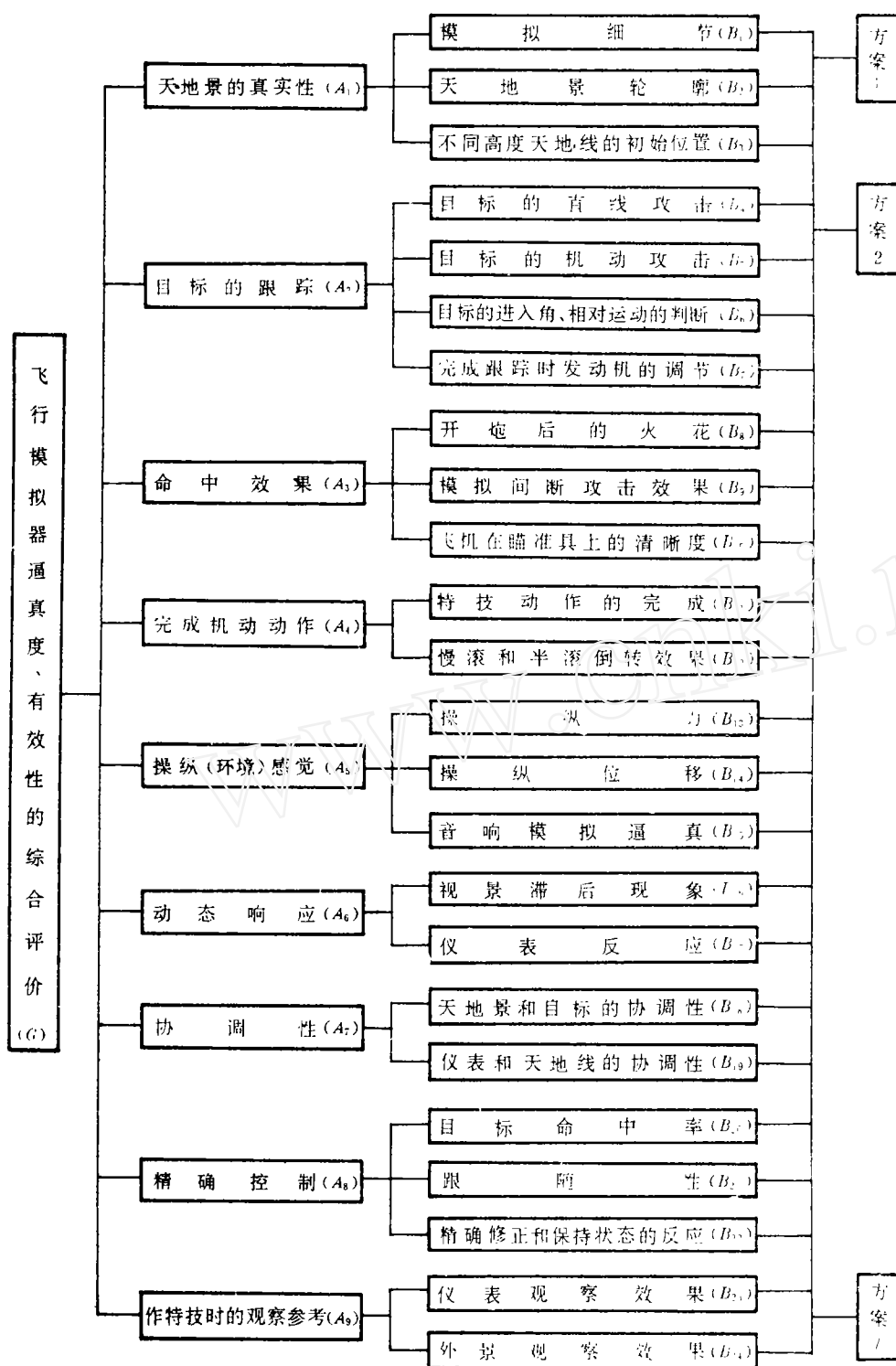


图2 飞行模拟器的综合评价层次结构模型

3 算例释义

本综合评价层次结构模型共有 34 个判断矩阵, 我们选择几个典型的判断矩阵, 阐述其含义以及主特征根对应的特征向量释义。

3.1 对总体目标

哪个方面的准则更为重要? 设判断矩阵元素为:

G	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	权 重
A_1	1	1/3	8	3	3	7	4	3	5	0.206187
A_2	3	1	9	3	3	9	5	7	8	0.339345
A_3	1/8	1/9	1	1/6	1/5	2	1/5	1/5	1/2	0.022072
A_4	1/3	1/3	5	3	1	6	3	1/2	3	0.117580
A_5	1/3	1/3	5	3	1	6	3	1/2	3	0.117580
A_6	1/7	1/9	1/2	1/6	1/6	1	1/5	1/5	1/3	0.018175
A_7	1/4	1/3	5	1	1/3	5	1	1/2	2	0.066887
A_8	1/3	1/3	5	2	2	5	2	1	1/2	0.097614
A_9	1/5	1/8	2	1/2	1/3	3	1/2	2	1	0.054888

利用 AHP (层次分析) 程序计算得 $\lambda_{\max} = 9.90574$ 相应的权重 (特征向量) 列在上表右列中。其含义表明, 对总体目标而言, 目标的跟踪性 A_2 应优先考虑, 其次是天地景的真实性 A_1 , 再次是操纵感觉 A_5 , 若用 “>” 表优先顺序, 则对本判断矩阵, 得:

$$A_2 > A_1 > A_5 > A_8 > A_4 > A_7 > A_9 > A_3 > A_6$$

进行一致性检验, 得:

$$C.I. = 0.113217$$

$$C.R. = 0.078081$$

满足要求。

3.2 对准则

哪个子准则更为重要?

我们仅以在目标的跟踪 A_2 支配下, 计算子准则 B_4, B_5, B_6, B_7 的相对重要性, 设判断矩阵元素为:

A_2	B_4	B_5	B_6	B_7	权 重
B_4	1	1/4	1/2	5	0.1678
B_5	4	1	2	7	0.5078
B_6	2	1/2	1	5	0.2727
B_7	1/5	1/7	1/5	1	0.0517

计算得 $\lambda_{\max}=4.10874$, 相应的权重(特征向量)列于上表右列中。并进行一致性检验得 $C.I.=0.0362$, $C.R.=0.0403<0.1$, 亦满足一致性要求。以上计算结果的含义为: 相对于 A_2 来讲, 目标的机动攻击性应优先考虑, 次之为目标的进入角和相对运动等, 即有:

$$B_5 > B_6 > B_4 > B_7$$

同理, 由式(5), 可求得第3层子准则相对于总目标的组合权重 W_3 , 在此,

$$W_2 = (0.2062, 0.3393, 0.0221, 0.0773, 0.1176, 0.0182,$$

$$0.0669, 0.0976, 0.0549)_{9 \times 1}^T$$

$$B_3 = (b_1^3, b_2^3, \dots, b_9^3)_{24 \times 9}$$

其中:

$$b_2^3 = (0, 0, 0, 0.1678, 0.5078, 0.2727, 0.0517, 0, 0, \dots, 0)_{24 \times 1}^T$$

例如, 对于本例, 计算得:

$$W_3 = (*, *, *, *, 0.05693, 0.1723, 0.0925, 0.0175,$$

$$*, *, \dots, *)_{24 \times 1}^T$$

表明相对总目标而言, B_4 的权重为 0.05693, B_5 的权重为 0.1723, B_6 的权重为 0.0925, B_7 权重为 0.0175, ...。于是得出所有子准则相对总目标的重要程度。

完全类似地, 可在得出各子准则支配下方案间判断矩阵之后, 对各方案进行单排序和总排序, 以进行方案的选择。

4 结 束 语

本文在参考文献[1]的基础上, 试图采用层次分析法对飞行模拟器的逼真度和有效性的综合评价问题进行探索, 力图建立起一个较为实用的层次结构的评价模型, 并提供一个解决这类主要依据人(专家)的主观判断的评价问题的定量求解思路。

研究表明, 采用层次分析法对飞行模拟器的逼真度和有效性进行综合评价, 从理论上是可行的。它可用于几种飞行模拟器的方案选择问题。更重要的, 可通过求解各层次评价因素相对于总目标的权重, 抓住主要矛盾, 以发现影响改进飞行模拟器逼真度、提高模拟器有效性的主要因素。

值得说明的是, 本文主要研究的是如何将飞行员的主观判断转化为定量求解。而实际上, 这类评价问题常常是定量、定性评价因素并存^[1]。从原理上讲, 在引入决策矩阵^[2]的概念之后, 本文提供的求解思路仍是有效的。

本文旨在于探索,文中算例仅作为释义说明。具体实施时,还须对判断矩阵作进一步的分析。特别地,有时专家(如飞行员)常常对自己给出的 1~9 标度的数值缺乏自信,这时,须求助于灵敏度分析的方法^{[2][3]},以确定优先权的变化幅度。

参 考 文 献

- 1 章伯定,俞志刚. 如何考虑工程模拟器的逼真度和有效性. 飞行力学, 1992; (4): 7~16
- 2 官建成,夏云禄. 飞机选型的综合评价与优先权灵敏度分析. 航空学报, 1993; (11): A 618~624
- 3 官建成,许兴林. 技术创新的决策研究与新产品开发. 北京航空航天大学学报, 1991; (4): 91~95
- 4 中国系统工程学会编. 系统工程应用案例集, 北京: 科学出版社, 1988
- 5 许树柏. 层次分析法原理. 天津: 天津大学出版社, 1988
- 6 Saaty T L. The Analytic Hierarchy Process, New York: Mc Graw-Hill Inc. 1980
- 7 Masuda T. Hierarchical Sensitivity Analysis of Priority Used in Analytic Hierarchy Process. Int. Journal of Systems Science, 1990; 21 (2): 415~427

A COMPREHENSIVE EVALUATION METHOD TO THE FLIGHT SIMULATOR

Guan Jiancheng, Qu Xiangju

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

Abstract In this paper, the multilevels comprehensive evaluation model, which can be used to evaluate the simulation fidelity and validity for the flight simulator is set up. On the basis of the theory of the Analytic Hierarchy Process (AHP), we discuss the pairwise comparison matrix and the priority analysis, i. e. the application of Analytic Hierarchy Process (AHP) in this field. The analysis shows that the analytic hierarchy process AHP is valid for this evaluation problem.

Key words Simulator Analytic hierarchy process Comprehensive evaluation