

# 基于 Fuzzy AHP 的 CBT 飞机维护系统评价\*

## Evaluation of CBT Aircraft Maintenance System Based on Fuzzy AHP

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 杜鹤民 余隋怀 初建杰 王伟伟

**[摘要]** 在确定 CBT 飞机维护系统评价指标的基础上,运用 Fuzzy AHP 综合评价法实现了定性指标的定量转换,建立了飞机维护系统的评价分析模型,克服了评价的主观性和随意性,实现了对飞机维护系统的科学评价。设计了 CBT 系统评价软件,解决了评价过程中大量的人工数学计算问题。研究表明,这种利用多级综合评价方法建立的评价系统可以方便有效地实现对飞机维护系统的评价。

**关键词:** Fuzzy AHP 法 CBT 飞机维护 系统评价

**[ABSTRACT]** Based on the establishment of evaluation index used in CBT aircraft maintenance system, the conversion of qualitative index to quantitative index is realized by using Fuzzy AHP synthesize evaluation method. The evaluation analytical model of aircraft maintenance system is built up to overcome the subjectivity and randomness of evaluation and to realize the scientific evaluation for the aircraft maintenance system. The CBT evaluation system is designed to solve the problem that there are a great deal of artificial mathematics in the evaluation process. The experiment shows that this kind of evaluation system can solve the evaluation problem of CBT aircraft maintenance system.

**Keywords:** Fuzzy AHP method CBT Aircraft maintenance System evaluation

随着虚拟现实技术的不断成熟,以该技术为基础的 CBT (Computer-Based Training) 技术在飞机维护训练中的地位变得越来越重要<sup>[1-2]</sup>。虚拟样机技术的核心是三维数字化建模/数字化预装配(CAD/DMU)、并行产品定义(CPD)和产品数据管理(PDM)。基于虚拟现实技术的 CBT 飞机维护系统的体系架构可大致概括为虚拟人和虚拟样机建模、虚拟人仿真、虚拟对象仿真、虚拟场景及

虚拟场景管理、仿真记录等部分<sup>[3-4]</sup>。

CBT 技术通过完整的过程模拟来辅助维修人员训练,生成相应的维修技术手册,摆脱了对物理样机或实体装备的依赖性,可以降低维修训练成本并提高训练效率。另一方面,在摆脱了操作实体以后,如何切实保证 CBT 技术训练的可靠性,在实现经济性的同时保证虚拟系统的高效性,需要通过科学的评价体系来论证。

在飞机维护评价方面, Tai-Chang Hsia 提出了基于质量分析矩阵的维修手册质量评价方法<sup>[5]</sup>;在类似的系统仿真方面,冉承新等运用 Fuzzy AHP 方法进行了仿真系统可信度的综合评价<sup>[6]</sup>;此外, Zeki Ayag 等运用 Fuzzy AHP 方法在工具交互性的选择方面进行了 MCDM (Multiple-Criteria Decision Making, 多标准决策制定)的研究<sup>[7]</sup>。在 CBT 飞机维护系统评价中,多数指标具有模糊性和不确定性。采用层次分析方法,并结合模糊数学的方法来处理和量化指标,可以实现对飞机维护系统的科学评价。

### 1 Fuzzy AHP 综合评价法原理

Thomas L. Saaty 在 20 世纪 70 年代提出了常规的 AHP (Analytic Hierarchy Process) 理论。AHP 作为决策评价理论被研究者广泛引用,其应用范围包括供应选择、业绩评估、项目管理、资源分配、预算决策、技术管理、矛盾冲突解决等方面。AHP 的核心是层次权重决策分析,其特点是:在对复杂决策问题的本质、影响因素及其内在关系等进行深入分析的基础上,提取出较少的定量信息使决策的思维过程数学化,为多目标、多准则或无结构特性的复杂决策问题提供简便的决策方法。

评估与决策的关键是选择合适的指标体系,评估指标可以分为定性指标和定量指标。为了能够科学客观地反映评价对象的质量特征,理论上应该尽量选择定量指标。然而,对于大多数评估与决策对象来说,并不是所有的质量特征都可以用定量指标进行描述,所以不可避免地要采用一定的定性指标。为了解决这对矛盾,在利用层次分析法进行评估决策时引入了模糊理论(Fuzzy

\* 国家 863 计划重点项目(2007AA040406)资助。

Logic),将两者结合形成 Fuzzy AHP 法。

模糊理论是 L.A.zadeh 提出的,它以模糊集合(Fuzzy Set)为基础,接受模糊性现象存在的事实,以概念模糊不确定的事物为研究目标,将模糊因素严密地量化成计算机可以处理的信息。

本课题中运用的 Fuzzy AHP 综合评价法指利用层次法构建评价指标体系,按照 9 级标度法<sup>[8]</sup>,对每一层次的各要素进行两两比较,建立判断矩阵,通过计算判断矩阵的最大特征值及其相应的特征向量得到权重向量。利用模糊理论建立评价指标集到评价集的模糊映射,计算评价指标对评价方案的隶属度矩阵并最终得到评价结果。在 CBT 飞机维护体系的评价中, Fuzzy AHP 的应用思路概括地讲就是选定评价指标,建立评价因素集,按照 AHP 法的思路定量地确定各评价指标的权重因子(权系数),通过模糊映射建立评价矩阵,根据数学模型的程序化编制评价软件,最终使决策者通过计算机的数学计算快速、简便地实现对维护系统的综合评价。

## 2 CBT 系统评价指标的选择

CBT 飞机维护系统性能的评价是否准确、科学,首先取决于评价指标的选取。软件系统的评价指标很多<sup>[9]</sup>,根据 CBT 系统的自身特点和使用环境的要求,提炼出其

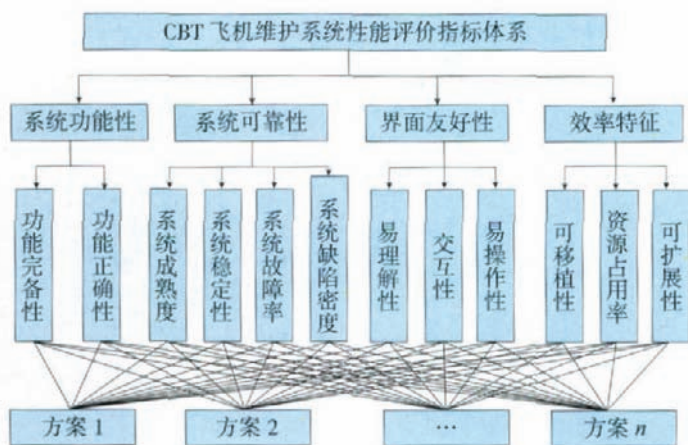


图1 CBT飞机维护系统性能评价指标体系

Fig.1 Evaluation index of CBT aircraft maintenance system

核心指标,并按指标的层次结构建立 CBT 飞机维护系统的性能评价指标体系,如图 1 所示。

### 2.1 系统功能性

CBT 系统的功能性指应满足飞机维护训练的明确或隐含的功能需求,具体指系统在虚拟人的操作姿态、虚拟样机的装配检测等方面应该考虑各种可能情况,可

以提供完备和正确的选择,因此在评价体系中可从功能的完备性和正确性 2 个方面对功能性进行评估。

### 2.2 系统可靠性

系统可靠性反映维护系统的整体性能水平,可以概括为系统的成熟度、稳定性、故障率和缺陷密度 4 个方面。系统成熟度指修正 Alpha 测试和 Beta 测试发现的明显缺陷后,系统具有的相对可行性;稳定性指 CBT 系统可以保证正常运行,出现死机等意外的情况较少;故障率指单位时间内的故障数,一般以每 1 000h 的故障数为单位,反映了软件处于稳定状态下的质量;缺陷密度指 CBT 软件系统单位源代码中隐藏的缺陷数量,通常以每千行的无注解源代码为单位。

### 2.3 界面友好性

界面友好性是人机工程学的重要指标之一,可以概括为易理解性、交互性和易操作性等要素。易理解性要求 CBT 软件系统的提示文档、语音或图标等简练、前后一致、易于理解以及无歧义;交互性指 CBT 系统对任何输入可产生相应的反应,能够及时、顺利地实现人机对话,像在实际产品上一样对虚拟产品进行各种操作,使仿真环境具有较好的沉浸感;易操作性指用户为操作和运行控制所消耗的精力较少,操作简单,尤其在军队飞机维护中,相对文化层次较低的飞机维护人员也能够快速地学习和操作飞机维护训练系统。

### 2.4 效率特征

效率特征表征规定条件下 CBT 软件系统的性能水平与所使用资源量之间的关系属性。可以将效率特征归结为可移植性、可扩展性和资源占用率 3 个方面。可移植性指 CBT 系统应该适应多种平台要求,可以稳定运行于不同操作系统中,对虚拟人、虚拟飞机零件以及虚拟场景等模型文件应该有宽广的数据接口,能够利用已有的产品设计数据,尤其是 CAD 数据;可扩展性指 CBT 系统根据特定单位飞机维护训练的特殊要求可以进行系统的修改、扩充;资源占用率反映了 CBT 系统对硬件系统的要求,在功能性等指标相对确定的情况下,资源占用率越低系统运行效率越高。

## 3 CBT 系统 Fuzzy AHP 评价模型的建立

### 3.1 各评价因素权重值的计算

在利用 AHP 法构建的评价体系中(图 1),准则层有 4 个评价因素,子准则层有 12 个评价因素。对单个准则层,将其评价因素进行两两比较,得到判断矩阵  $A$  为

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}。$$

式中,  $a_{ij}(i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n)$  为因素  $i$  相对于因素  $j$  的重要性, 两元素的相对重要性按 9 级标度法在 1、3、5、7、9 间取值(如表 1 所示), 具有如下特征: 当  $i=j$  时,  $a_{ij}=1$ ; 当  $i \neq j$  时,  $a_{ji} = 1/a_{ij}$ 。

表 1 两因素相对重要性取值

评价级别	绝对重要	重要得多	很重要	略为重要	相同重要
$a_{ij}$	9	7	5	3	1

对矩阵因素运算的目的是得到每个因素相对于整体的重要性, 即评价因素的权重值。

设各因素的权重向量为  $W=(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n)^T$ , 则

$$A \times W = \lambda_{\max} \times W。 \quad (1)$$

式中,  $\lambda_{\max}$  是矩阵  $A$  的最大特征值。通过求解式(1)得到权重向量  $W$ 。在编程中, 为简化计算, 采用规范列平均法(列和法)求解  $W$  和  $\lambda_{\max}$ 。

将  $A$  的元素按列进行归一化处理, 即

$$\bar{a}_{ij} = a_{ij} / \sum_{k=1}^n a_{kj}, \text{ 得到矩阵 } \bar{A} = [\bar{a}_{ij}]。$$

求  $A$  各行和的平均值, 即  $\omega_i = 1/n \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij}$ , 得到权重

向量  $W=(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n)^T$ 。

### 3.2 判断矩阵的一致性检验

计算一致性指标  $CI=(\lambda_{\max}-n)/(n-1)$ , 计算相对一致性指标  $CR=CI/RI$ , 其中平均随机一致性指标  $RI$  可以通过表 2 查到。

计算求得的  $CR$  越小, 表明判断矩阵的一致性越好。当  $CR \leq 0.1$  时, 即认为判断矩阵具有令人满意的一致性; 否则, 必须重新进行两两比较判断, 并使之具有满意的一致性。当通过一致性检验时, 表明近似特征向量能够客观表征 CBT 飞机维护系统评价因素的权重, 可用于后续的 Fuzzy AHP 综合评价。

表 2 平均随机一致性指标取值  $RI$

矩阵维数 $n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$RI$ 值	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

### 3.3 模糊评价隶属度函数的建立

设 CBT 系统评价因素构成的集合为  $U=\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ , 定评语集为  $V=\{v_1, v_2, \dots, v_5\}$ , 评语及其取值如表 3 所示。

表 3 评价集取值对照表

评价级别	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$v_4$	$v_5$
评语	差	一般	比较好	好	很好
取值	50	60	70	80	90

根据表 3 建立隶属度模糊函数公式, 即

$$u_{v_1}(x) = \begin{cases} 1 & 0 \leq x < 50 \\ (60-x)/10 & 50 \leq x < 60 \\ 0 & 60 \leq x \leq 100 \end{cases},$$

$$u_{v_2}(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 50 \\ (x-50)/10 & 50 \leq x < 60 \\ 1 & x = 60 \\ (70-x)/10 & 60 < x < 70 \\ 0 & 70 \leq x \leq 100 \end{cases},$$

$$u_{v_3}(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 60 \\ (x-60)/10 & 60 \leq x < 70 \\ 1 & x = 70 \\ (80-x)/10 & 70 < x < 80 \\ 0 & 80 \leq x \leq 100 \end{cases},$$

$$u_{v_4}(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 70 \\ (x-70)/10 & 70 \leq x < 80 \\ 1 & x = 80 \\ (90-x)/10 & 80 < x < 90 \\ 0 & 90 \leq x \leq 100 \end{cases},$$

$$u_{v_5}(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 80 \\ (80-x)/10 & 80 \leq x < 90 \\ 1 & 90 \leq x < 100 \end{cases}。$$

式中,  $x$  为专家针对 CBT 系统的某一评价指标给定的分数。当评判专家对指标打分后, 根据隶属度函数公式可计算出各级别评价因素的隶属度矩阵, 记为:  $R_j=(r_{j1}, r_{j2}, r_{j3}, r_{j4}, r_{j5})$ ;  $R_i=(R_{i1}, R_{i2}, \dots, R_{ik})^T$ , 其中  $k$  为  $U_i$  含有的下一层指标的个数。

### 3.4 Fuzzy AHP 综合评价

根据由 AHP 法得出的影响因素权重矩阵和隶属度评价矩阵进行综合评价。

首先, 求解子准则层指标的综合评价向量  $B_i$ :

$$B_i = \omega_{li} \times R_i,$$

式中,  $\omega_{li}$  为子准则层影响因素权重矩阵。CBT 评价系统中准则层因素数为 4, 因此  $i=1, 2, 3, 4$ 。

准则层评价矩阵:  $B=(B_1, B_2, \dots, B_n)^T$ 。

决策层评价向量:  $C = \omega_2 \times B$ , 其中  $\omega_2$  为准则层影响因素权重矩阵。

评价得分  $f = C \times S^T$ , 其中  $S = (50, 60, 70, 80, 90)$ 。比较评价集, 给出 CBT 系统的质量评价。

#### 4 应用验证

根据上述算法, 采用 VC 编制了 CBT 飞机维护系统评价系统软件, 其结构如图 2 所示。

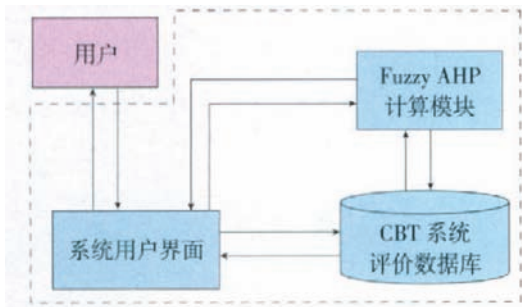


图 2 CBT 系统评价软件结构图  
Fig.2 Structure chart of CBT system evaluation software

评价软件按文中的描述建立了 CBT 系统评价因素集, 且允许系统管理员按层次法原理修改和补充评价的层次及其评价指标; Fuzzy AHP 模块依据文中的数学模型编制了数据处理程序。用户在使用本软件时, 可以在用户界面中输入权重评价数据, 系统按 AHP 自动计算出评价指标的权重值, 在不修改评价因素集时, 权重值可重复使用。在对 CBT 系统进行评价时, 可以指定参与评价的专家数, 并按百分制由专家对评价指标进行打分, 系统会根据模糊映射程序并结合指标权重值自动计算出系统的综合评分。CBT 飞机维护评价系统界面如图 3 所示。



图 3 CBT 飞机维护评价系统界面  
Fig.3 Interface of CBT aircraft maintenance evaluation system

#### 5 结论

根据 AHP 法确定指标权重, 采用降半梯形分布隶属度函数将各等级评语的边界模糊化, 通过编制评价软件实现了对 CBT 飞机维护系统多层次阶层的多级模糊评价。

(1) 建立了定性指标的科学量化转换模型, 实现了定性问题的定量处理;

(2) 该方法思路清晰, 具有较强的科学性和可信度, 避免了评价中的主观随意性;

(3) 通过编制软件, 实现了繁琐数学计算的自动化处理, 具有较强的推广性和普适性。

#### 参 考 文 献

[1] Kraus D C, Gramopadhye A K. Effect of team training on aircraft maintenance technicians: computer-based training versus instructor-based training. International Journal of Industrial Ergonomics, 2001, 27: 141-157.

[2] Jeenal Vora. Using virtual reality technology for aircraft visual inspection training: presence and comparison studies. Applied Ergonomics, 2002, 33: 559-570.

[3] 冯雷, 范玉青. 飞机技术虚拟样机技术与实现. 航空制造技术, 2004 (10): 88-91.

[4] 蒋科艺, 郝建平. 沉浸式虚拟维修仿真系统及其实现. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(5): 1120-1123.

[5] Hsia T C. Evaluating the writing quality of aircraft maintenance technical orders using a quality performance matrix. International Journal of Industrial Ergonomics, 2007, 37: 605-613.

[6] 冉承新, 凌云翔. AHP-Fuzzy 在仿真系统可信度综合评价中的应用. 计算机仿真, 2005, 22(8): 59-61.

[7] Ayag Z, Özdemir R G. A fuzzy AHP approach to evaluating machine tool alternatives. Intell Manuf, 2006, 17: 179-190.

[8] Saaty T L. Decision making, scaling, and number crunching. Decision Science, 1989, 20: 404-409.

[9] 刘儒德. 教学软件的选用与评价. 北京: 人民邮电出版社, 1997. (责编 良辰)

#### 首架国产大飞机外形样机 将亮相亚洲航展

近日, 中国商飞宣布, 将在今年 9 月举行的亚洲国际航空展览会暨论坛上展示中国首架国产大飞机 C919 的外形样机, 这将是 C919 首次向国际市场亮相。C919 专案于去年 11 月启动。按照计划, 首架飞机将于 2016 年交付订购航线使用, 并会在其后开发其增长程型飞机、货运飞机及商务飞机。

(本刊记者 微凉)