

# 基于层次分析法的民用客机发动机技术评价与选型

王 鹏<sup>1,2</sup>, 陈迎春<sup>1</sup>, 司江涛<sup>1</sup>, 何必海<sup>1</sup>

(1. 中国商飞上海飞机设计研究院, 上海 201210; 2. 上海交通大学航空航天学院, 上海 200240)

**摘要:**层次分析法是一种有效实用的多目标决策方法。针对在大型客机研制中科学选择适合的民用航空发动机问题特点, 基于层次分析法, 将发动机的选型要求层次化分解, 建立了指标技术评估模型, 并考虑不同评估专家分配不同权重的方法。以现有民用发动机为例进行分析。分析结果表明: 层次分析法在民用客机发动机选择中具有合理性、科学性, 符合市场实际情况, 适用于民用客机发动机方案选型, 并可为民用客机发动机工程技术评估提供科学依据。

**关键词:**层次分析法; 民用客机; 航空发动机; 选型

中图分类号: V219

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2016.05.017

## Technology Evaluation and Choice of Civil Aircraft Engine Based on Analytic Hierarchy Process

WANG Peng<sup>1,2</sup>, CHEN Ying-chun<sup>1</sup>, SI Jiang-tao<sup>1</sup>, HE Bi-hai<sup>1</sup>

(1. COMAC Shanghai Aircraft Design Institute, Shanghai 201210, China; 2. School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Analytic Hierarchy Process (AHP) is an effective and practical multi-objective decision-making method. Aiming at the characteristics of the suitable civil aeroengine selected scientifically in development of civil aircraft, the choice requirement of engine was decomposed hierarchically based on AHP. The evaluation model of index technology was built, and the method of different evaluation experts assigned different weights was considered. Taking the existing civil engine as example, the analysis results show that AHP is reasonable, scientific in the choice of civil aircraft engine, and fits market fact. The method is suitable for the scheme choice of civil aircraft engine, and provides the scientific basis for engineering technology evaluation for civil aircraft engine.

**Key words:** AHP; civil aircraft; aeroengine; choice

## 0 引言

发动机的噪声和排放直接影响民用客机的适航性和舒适性, 发动机的耗油率和可靠性在很大程度上影响飞机的经济性和安全性。在民用客机设计初期, 对候选民用客机发动机的评价要取得成效, 必须依据一套科学可信的评估选择方法。

民用客机发动机的技术选型是一项复杂的系统工程, 涉及到学科和内容有飞机性能、发动机性能、气动阻力、质量尺寸、安全性、环保性、供应商能力经验等。并且由于民用客机的售价高达上亿美元, 使用寿命在 20 a 左右, 因此, 民用发动机技术参数的选择是否合理, 选型是否合适、将会直接影响航空公司未来 20 a 的发展和盈利<sup>[1]</sup>。

本文利用层次分析法这种定性和定量相结合的方法, 对候选航空民用发动机进行全面、客观的评价与技术选择<sup>[2-6]</sup>, 并且考虑发动机需满足飞机要求的各项指标, 建立一套技术评价指标体系, 得出各种影响因素的权重系数。通过对影响民用发动机各指标的评价和分析, 对候选发动机进行综合技术评估, 选出符合民用客机要求的最适合的发动机<sup>[7-9]</sup>。为整体综合评价候选民用发动机提供一种实用可行的定量综合评价方法, 具有重要的现实意义。

## 1 技术评估指标

民用发动机的评价涉及到的多种参数之间关系复杂, 某些评估指标之间相互影响和制约, 所以不能简单使用定量的方法来确定。评价指标选择应有代表

收稿日期: 2016-03-22 基金项目:

作者简介: 王鹏(1976), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事民用飞机推进系统集成设计工作; E-mail: wangpeng@comac.cc。

引用格式: 王鹏, 陈迎春, 司江涛, 等. 基于层次分析法的民用客机发动机技术评价与选型 [J]. 航空发动机, 2016, 42(5): 98-102. WANG Peng, CHEN Yingchun, SI Jiangtao, et al. Technology evaluation and choice of civil aircraft engine based on Analytic Hierarchy Process [J]. Aeroengine, 2016, 42(5): 98-102.

性,在数据可信性、独立性的原则上选取<sup>[9]</sup>。从而按照评价指标全面、层次清晰,能够简明科学地构建反映民用发动机综合性能的评估模型,其评价指标的选取应着眼于发动机整体性能和飞机总体需求。本文选取发动机综合性能评价指标的流程<sup>[10]</sup>如图 1 所示。

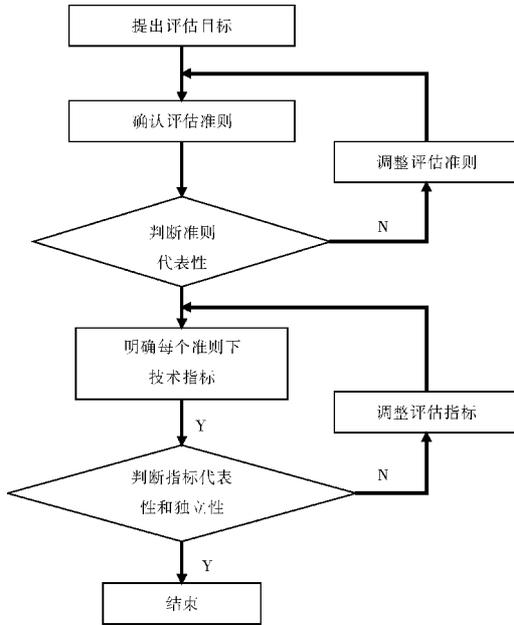


图 1 评价指标建立流程

评价民用发动机的指标与因素较多,各指标的范畴不尽相同,因此民用发动机选型是 1 个复杂的决策过程。对于发动机的总体评价可分解为多方面,本文确定发动机技术评价指标<sup>[11-15]</sup>如图 2 所示。对选用指标进行分类,归纳到某具体特性来反映民用飞机总体性能的分性能<sup>[5]</sup>,构成评估模型的中间层。

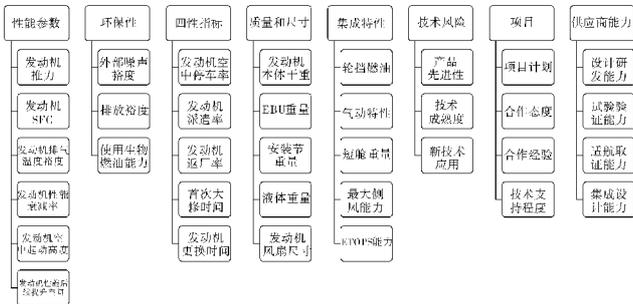


图 2 发动机技术评价指标

## 2 层次分析法

### 2.1 层次分析法的概念<sup>[16-17]</sup>

民用发动机优化选型的决策问题可以归结为运筹学研究的范围,目前国内外多采用模糊评判法、聚

类分析法、层次分析法等进行计算决策。其中层次分析法计算的误差最小,并且由于其在处理复杂的决策问题上的实用性和有效性,在大型决策问题中应用最广。其最大优点是可以处理定性和定量相结合的问题,可以将决策者的主观判断与政策经验导入模型,并加以量化处理。采用层次分析法综合评估候选民用客机发动机供应商。

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, 简称 AHP) 是将与任务决策相关的元素分解成目标、准则、方案等层次,在此基础上进行定性和定量分析相结合的多目标决策分析方法论。该方法是美国运筹学家匹茨堡大学教授萨蒂 (T·L·Satty) 于 20 世纪 70 年代初提出的 1 种层次权重决策分析方法。其特点是在对需要决策的复杂问题的影响因素及其内在关系等进行深入分析的基础上,利用少量的定量数据使决策的过程数学化,从而能为多准则、无明显结构特性的复杂决策问题提供简便的决策方法。

### 2.2 计算流程

运用 AHP 方法建模,通常分为 5 个步骤进行<sup>[10]</sup>,计算流程如图 3 所示。

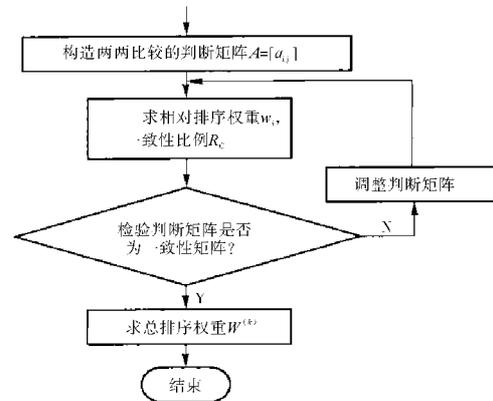


图 3 计算流程

### 2.3 递阶层次结构模型建立

民用客机发动机优化选型模型,首先要将民用发动机选型评估问题条理化、层次化,构造出 1 个层次分析的结构模型。在分析模型中,将选型的复杂问题分解为各种组成部分(称为元素),再按属性将元素分成若干组。将同组元素作为准则,对组内元素起支配作用,同时又受到同一层次目标层的支配。最高层是目标层,是需要解决问题的预定目标,中间层各组为实现目标所涉及、考虑的准则,最底层为实现目标可能采取的各种措施、技术指标等。

使用层次分析法建立发动机选型模型包括 4 个层次：第 1 层目标层为最终优选民用客机发动机；第 2 层准则层为发动机选优的评价方面(准则)；第 3 层为各准则层下对应的具体发动机指标参数；第 4 层方案层为备选民用发动机。

判断矩阵构造、权重系数计算、判断矩阵一致性检验、目标层的权重计算等采用常规方法,不在此详细描述。

### 3 民用发动机评估

#### 3.1 评估模型建立

根据民用飞机的顶层发动机需求,首先提出 1 个总目标。为了能对候选发动机进行评价,提高选型评估和选择的准确性和客观性,将各指标和需求按层次分解。将发动机相关各参数和因素根据其相互关联和隶属关系划分为 1 个多层次的分析结构模型,对同一层次内的诸因素通过两两比较的方法确定出相对于上 1 层目标的各自的权系数。这样层层分析下去,直到最后 1 层,即可给出所有因素相对于总目标而言的重要性程度的排序。分析步骤如图 4 所示。

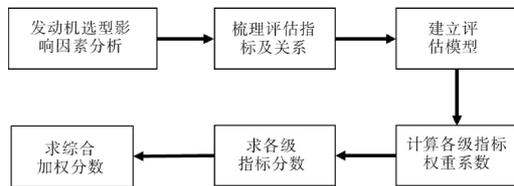


图 4 发动机选型 AHP 分析步骤

建立基于层次分析法的动力装置系统选择评估模型,用来进行发动机评价和选择,见表 1。

#### 3.2 专家打分与客观数据结合的权重计算

由于各发动机评价和分性能指标对发动机综合性能的影响程度不同,需要明确评估指标间的权重。采用专家打分的方法构成判断矩阵,请专家将指标层对准则层的重要程度,准则层对目标层的重要程度进行比较,得出判断矩阵。如准则层 6 个分性能对准则层的判断矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1/2 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

计算得出准则层 3 个分性能对目标层的相对权重为(0.5396 0.2970 0.1634),同理可以计算出指标层对准则层的相对权重 (0.4673 0.2772 0.1601

表 1 候选发动机 AHP 模型结构

目标层	最优候选发动机							
准则层	性能参数	环保性	4 性指标	质量和尺寸	集成特性	技术风险	项目	供应商能力
	发动机推力	外部噪声裕度	发动机空中停车率	发动机本体干质量	换挡燃油	产品先进性	项目计划	设计研发能力
	发动机 SFC	排放裕度	发动机派遣率	EBU 质量	气动特性	技术成熟度	合作态度	试验验证能力
	发动机排气温度裕度	使用生物燃油能力	发动机返厂率	安装节质量	短舱质量	新技术应用	合作经验	适航取证能力
指标层	发动机性能衰减率		首次大修时间	液体质量	最大侧风能力		技术支持程度	集成设计能力
	发动机空中起动手高度		发动机更换时间	发动机风扇尺寸	ETOP S能力			
	发动机性能持续提升空间							

0.0954), 以及所有指标层对准则层的相对权重系数 (0.5396 0.2970 0.1634),(0.6667 0.3333)。由式(3)可计算出所有指标层参数对目标层的权重系数 (0.2522 0.1496 0.0864 0.0515 ... .. 0.1089 0.0545)。同时考虑不同专家间的权重影响。

针对被评价候选民用发动机,采用发动机原始数据对比和专家定性评估相结合的方法,生成判断矩阵,计算方法同上。

### 4 实例分析

为了能够更好地说明以上建立的候选民用发动机技术评价方法和评估模型,以国际知名的 3 种发动机为评价对象,根据民用客机的实际需求,举例分析。按照 AHP 法建立的评估模型,通过专家打分计算得出最终的准则层对目标层的权重系数见表 2。

同样,通过专家打分计算得出指标层对准则层的权重系数,见表 3。

候选发动机评估结果见表 4,发动机 A 与 B 分析结果相差不大,此 2 型发动机在国际上市场占有率大,分析结果符合实际航空公司选择结果。计算结果显示发动机 A 最优,表示该型发动机更适合该型飞

表 2 准则层对目标层的权重系数

准则层	对目标层的权系数
性能参数	0.2707
环保性	0.0922
4 性指标	0.0930
质量和尺寸	0.1637
集成特性	0.1844
技术风险	0.0776
项目	0.0528
供应商能力	0.0656

表 4 候选发动机评估结果

分项权系数	发动机 A	发动机 B	发动机 C
性能参数	9.8591	9.4379	7.7699
环保性	4.5148	3.6360	1.0673
4 性指标	4.2661	3.2171	1.8134
质量和尺寸	5.6764	5.5091	5.1878
集成特性	6.4940	6.4434	5.5068
技术风险	2.6674	2.2228	2.8703
项目	1.9193	1.7499	1.6094
供应商能力	2.2387	2.0843	2.2387
优选总权重	37.6358	34.3006	28.0636

注:分析用发动机数据来自供应商和互联网。

表 3 指标层对准则层的权重系数

目标层	性能参数	环保性	四性指标	质量和尺寸	集成特性	技术风险	项目	供应商能力	
指标层	发动机 推力	0.3900	外部噪声裕度 0.3764	发动机 空中停车率 0.4591	发动机本体 干质量 0.3739	换挡 燃油 0.4078	产品 先进性 0.2377	项目计划 0.1277	设计研发能力 0.2000
	发动机 SFC	0.2619	排放裕度 0.5243	发动机 派遣率 0.1545	EBU 质量 0.1419	气动 特性 0.2148	技术 成熟度 0.6072	合作态度 0.1952	试验验证能力 0.2000
	发动机 排气温度裕度	0.0599	使用生物燃油 能力 0.0993	发动机 返厂率 0.1545	安装节 质量 0.1308	短舱 质量 0.0978	新技术 应用 0.1551	合作经验 0.2247	适航取证能力 0.2000
	发动机 性能衰减率	0.1123		首次大修时间 0.1469	液体质量 0.0560	最大 侧风能力 0.1822	技术支持 程度 0.4524	集成设计能力 0.4000	
	发动机 空中起动高度	0.0740		发动机 更换时间 0.0849	发动机风扇 尺寸 0.2975	ETOPS 能力 0.0974			
	发动机 性能提升空间	0.1020							

机。算例表明使用层次分析法建立的发动机选型分析计算模型正确、客观的反映了动力装置评估内容,并形成 1 个直观的数值结果。

### 5 结束语

民用客机发动机是 1 个极为复杂的系统,对民用客机的影响因素繁多,因此对候选民用发动机客观的技术评估是 1 件难度较大且复杂的工作,而民用客机发动机选型直接影响民用客机运营的性能和研发成本。本文将层次分析法引入民用客机候选发动机的技术评价与选择,建立其综合评价指标体系和选型评估

方法,并建立选型评估模型,实现了对候选发动机实施有效、科学、客观的综合评估和选择。从以上应用实例的分析评价结果看,该方法切实可行、符合客观实际。将候选发动机的各种影响因素以数值形式表现出来,对比效果直观,有助于选择适合的民用客机发动机,提高客机在未来市场中的竞争力,并为民用发动机综合评估论证提供了一定的理论依据,具有重要的现实意义。

#### 参考文献:

[1] 侯大为. 飞机选型中供应商的选择研究 [J]. 科技与创新, 2015 (17):

- 2-3.  
HOU Dawei. Research on supplier selection in aircraft type selection [J]. Science and Technology and Innovation, 2015 (17): 2-3. (in Chinese)
- [2] 刘积仓, 刘育敏, 杨廷勃, 等. 飞机设计手册: 第七册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1995: 257-262  
LIU Jicang, LIU Yumin, YANG Tingbo et al. Aircraft design manual (7th album)[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1995: 257-262. (in Chinese)
- [3] 窦宝华, 杨东. 基于层次分析法的公交车天然气发动机选型研究[J]. 中国高新技术企业, 2010 (9): 101-102.  
DOU Baohua, YANG Dong. Analytic Hierarchy Process bus based on natural gas engine selection [J]. China Hi-Tech Enterprises, 2010(9): 101-102. (in Chinese)
- [4] 胡庆江, 郭静雯. 层次分析法在民用客机项目供应商选择中的应用[J]. 国防技术基础, 2009(1): 54-58  
HU Qingjiang, GUO Jingwen. Application of AHP in civil aircraft project supplier selection [J]. Technology Foundation of National Defense, 2009(1): 54-58. (in Chinese)
- [5] 郑玛丽, 高丽丽, 孙西超. 多目标决策在供应商选择中的应用研究[J]. 阜阳师范学院学报(自然科学版), 2011 (3):31-35.  
ZHENG Mali, GAO Lili, SUN Xichao. Application of multiple objective decision making in supplier selection [J]. Journal of Fuyang Teachers College (Natural Science), 2011(3):31-35. (in Chinese)
- [6] 王磊. 基于模糊层次分析的工程采购供应商的选择[J]. 项目管理技术, 2015, 13(3): 57-60  
WANG Lei. Based on fuzzy Analytic Hierarchy Process engineering procurement vendor selection [J]. Project Management Technology, 2015, 13(3): 57-60. (in Chinese)
- [7] 吴学辉, 陶增元. 多型航空发动机备份量的决策方法 [J]. 航空发动机, 2005, 31(1):40-43.  
WU Xuehui, TAO Zengyuan. Decision making method of spare quantity for polytypic aeroengine[J]. Aeroengine, 2005, 31(1):40-43. (in Chinese)
- [8] 王帅, 康力平. 航空发动机综合权值排队系统的建立与应用 [J]. 中国民航学院学报, 2004(6): 157-160.  
WANG Shuai, KANG Liping. Aero engine integrated development and application of weighted queueing system [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2004(6): 157-160. (in Chinese)
- [9] 罗韬, 任洪安. 基于多层次模糊综合评价法的动力传动系统性能评价[J]. 装甲兵装备技术研究, 2006(6):2-8.  
LUO Tao, REN Hongan. Performance evaluation on power transmission system by multi-hierarchical fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Research in Equipment and Technology for Armored Force, 2006 (6):2-8. (in Chinese)
- [10] 张志强, 徐斌, 何勇灵, 等. 基于 AHP 评价方法的发动机性能评价 [J]. 兵工学报, 2008(5):625-628.  
ZHANG Zhiqiang, XU Bin, HE Yongling et al. Engine performance evaluation based on Analytic Hierarchy Process [J]. Acta Armamentarii, 2008(5):625-628. (in Chinese)
- [11] 张伟, 蔡元虎, 苏三买, 等. 推进系统选优的定量分析及数值模拟 [J]. 航空动力学报, 2010, 25 (11): 2450-2456.  
ZHANG Wei, CAI Yuanhu, SU Sanmai. Quantitative analysis and numerical simulation of optimization of a propulsion system[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25 (11): 2450-2456. (in Chinese)
- [12] 黄兆东, 刘锦, 吴静敏. 民用航空发动机使用经济性研究[J]. 航空发动机, 2015,41(2): 99-102  
HUANG Zhaodong, LIU Jin, WU Jingmin. Research on civil aero-engine operation economics[J]. Aeroengine, 2015, 41(2): 99-102. (in Chinese)
- [13] 何照, 于镒隆, 王勇, 等. 发动机性能综合评价的现状与趋势[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2014(6):85-90.  
HE Zhao, YU Yilong, WANG Yong, et al. The situation and trends of comprehensive performance evaluation of engines [J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technique, 2014 (6): 85-90. (in Chinese)
- [14] 谭巍, 徐健, 薛庆增. 基于统计分析的发动机性能衰减指标研究[J]. 航空计算技术, 2015(1): 87-90.  
TAN Wei, XU Jian, XUE Qingzeng. Research on engine performance deterioration index based on statistical analysis[J]. Aeronautical Computing Technique. 2015(1): 87-90. (in Chinese)
- [15] 王团结, 李本威, 于复磊, 等. 涡扇发动机性能参数指标论证方法 [J]. 海军航空工程学院学报, 2014(6): 511-516.  
WANG Tuanjie, LI Benwei, Yu Fulei, et al. Index parameters demonstration method turbofan engine performance [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2014 (6): 511-516. (in Chinese)
- [16] Soliman A H, Gadi A M, Wyatt D A, et al. Regulatory reform and freight mode choice[J]. Transportation, 1991, 18(18):261-284
- [17] 郭齐胜, 董志明, 单家元. 系统建模 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006:292-297.  
GUO Qisheng, DONG Zhiming, SHAN Jiayuan. System model building[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006:292-297. (in Chinese)

(编辑:张宝玲)