

文章编号:1674-8190(2021)02-136-07

# 基于可靠性、维修性和测试性的民用飞机 供应商选择

黄艳, 蔡景, 代定强, 李海亮

(南京航空航天大学 民航学院, 南京 211106)

**摘要:** 民用飞机的研制需要供应商的协同和支持, 因此民用飞机供应商的选择至关重要。为满足民用飞机着重于可靠性、维修性和测试性的设计理念, 提出基于可靠性、维修性和测试性的民用飞机供应商选择方法。首先介绍民用飞机供应商的分类; 其次建立基于不同类型民用飞机供应商的选择准则, 并基于选择准则列举相对应的下属指标; 最后采用层次分析法, 建立氧气系统供应商的选择模型并模拟专家打分, 得出不同供应商各准则和指标的权重, 根据评分选择最优供应商。结果表明: 该方法能够为民用飞机供应商的选择提供不同选择视角, 满足现代民用飞机设计理念下对供应商选择的需求。

**关键词:** 民用飞机; 供应商; 可靠性; 维修性; 测试性

**中图分类号:** V268.7

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.02.16

**文献标识码:** A

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Civil Aircraft Supplier Selection Based on Reliability, Maintainability and Testability

HUANG Yan, CAI Jing, DAI Dingqiang, LI Hailiang

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** The development of civil aircraft requires the collaboration and support of suppliers, so the choice of civil aircraft supplier is crucial. In order to meet the design concept of modern civil aircraft that emphasizes reliability, maintainability and testability, a method for selecting civil aircraft suppliers based on the three indicators is proposed. Firstly, the classification of civil aircraft suppliers is introduced. Secondly, the selection criteria considering different types of civil aircraft suppliers is established, and the subordinate indicators corresponding to each criteria are listed. Finally, the analytic hierarchy process method is selected to establish the selection model of the oxygen system suppliers as well as make expert score simulation, and the importance of the indicators and criteria of different suppliers are obtained. The results show that the proposed method can provide different selection views for supplier of civil aircraft, satisfy the requirement of supplier selection demand under the design concept of civil aircraft.

**Key words:** civil aircraft; supplier; reliability; maintenance; testability

收稿日期: 2020-07-09; 修回日期: 2020-09-21

通信作者: 蔡景, caijing@nuaa.edu.cn

引用格式: 黄艳, 蔡景, 代定强, 等. 基于可靠性、维修性和测试性的民用飞机供应商选择[J]. 航空工程进展, 2021, 12(2): 136-142, 156.  
HUANG Yan, CAI Jing, DAI Dingqiang, et al. Civil aircraft supplier selection based on reliability, maintainability and testability [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(2): 136-142, 156. (in Chinese)

## 0 引言

当前民用飞机“主制造商—供应商”的研制模式使得各飞机厂商与供应商之间建立风险合作关系,选择合适的民用飞机供应商不仅能够完善企业的供应链体系,同时也能降低飞机研制风险,加快研制进程。

目前国内外对民用飞机供应商的选择都做了相关研究。在供应商选择指标方面,G. W. Dickson<sup>[1]</sup>最先对供应商选择准则进行了研究,统计出23条评价供应商的准则,排序得出前三的选择准则为:质量、交货、历史效益;C. A. Weber等<sup>[2]</sup>在此基础上,将质量、价格、准时交付列为选择的三个重要原则;郭巧荣等<sup>[3]</sup>基于层次分析法提出了民用飞机供应商质量保证体系并建立了对应的评价模型;刘翔锋等<sup>[4]</sup>提出供应商选择的主要准则为价格、质量、交付等,并将准则继续分为多个指标,进行权重打分,选出合适的供应商;曹广生<sup>[5]</sup>提出“主制造商—供应商”模式下的民用飞机评估要素包括两种,一种为特色要素,这种要素需要根据被评估单位的特点进行确定和选取,另一种要素为公共要素,包括资源投入能力、优势保障能力、管理协调能力等。

现代航空器对可靠性、安全性和经济性的要求越来越高,而在以往民用飞机产品供应商的选择过程中,虽然涉及到与可靠性、维修性和测试性相关的指标,但这些指标不能直接衡量供应商产品的可靠性、维修性和测试性,无法满足新的设计理念对民航产品的要求。

本文提出基于可靠性、维修性和测试性的民用飞机供应商选择方法,以民用飞机氧气系统供应商为例,从产品可靠性和可用度的角度对供应商进行评估。

## 1 供应商分类

供应商有多种分类方式,如图1所示。为了全面清晰地对不同种类供应商提出可靠性要求,以

便更简洁科学地选取指标进行评估,本文按照供应商在民用飞机产业链中的地位将其分为一类供应商(大部件/分系统制造商)、二类供应商(小系统/部件和专业化零件)、三类供应商(原材料、标准件供应商)<sup>[6]</sup>,分别分析其可靠性、维修性和测试性要求,提出相应指标。

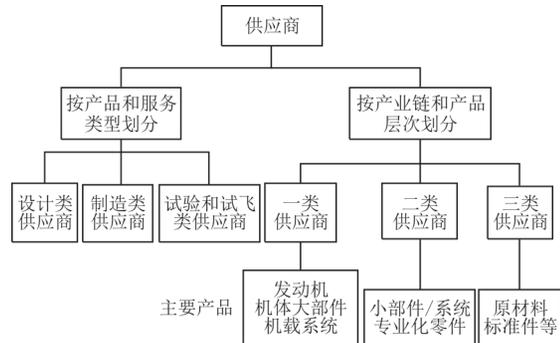


Fig. 1 Classification of civil aircraft suppliers

按产业链和产品层次划分的供应商种类有如下特点:

- (1) 一类供应商,其产品价值相对高、技术相对复杂、集成度相对高、携带风险大。
- (2) 二类供应商,如复合材料件、金属合金件制造商,其产品价值相对较高、技术较复杂、集成化程度相对不高。
- (3) 三类供应商,其产品价值相对不高、技术相对较为简单、种类繁多、项目琐碎。

## 2 不同类型供应商的选择准则与指标

在选取选择准则与指标时,需要遵循目的性原则、现实性原则、系统全面性原则和定量与定性相结合的原则<sup>[7]</sup>。考虑民用飞机产品的高要求、高风险性,为形成全面且合理的评估准则指标体系,除了可靠性、维修性和测试性三个中心准则外,仍需将一般制造业评估体系中的质量、服务、技术、体系准则纳入考虑范围。由于民用飞机一、二类供应商主要是系统供应商,因此其指标相同。民用飞机一、二类供应商的选择准则与指标如表1所示。

表 1 基于可靠性、维修性和测试性的民用飞机一、二类  
供应商选择准则和评价指标

Table 1 Selection criteria and evaluation indicators of the  
first and second class suppliers of civil aircraft based on  
reliability, maintainability and testability

选择准则	评价指标
可靠性	签派可靠度
	航班可靠度
	平均故障间隔飞行小时
	平均故障间隔时间
	平均非计划拆卸时间
	机组报告故障率
	失效率
维修性	平均使用总寿命
	平均修复时间
	航线可更换单元更换时间
	每飞行小时维修工时
	每飞行小时直接维修成本
	预防性维修时间
	平均产品恢复时间
测试性	故障检测率
	故障隔离率
	虚警率
	故障检测时间
	故障隔离时间
质量	产品合格率
	产品性能
	返修退货比率
	使用困难报告率
	以往产品可靠性数据
服务	可靠性文件符合率
	现场工作支持情况
	试验支持
	担保年限
技术	生产能力
	设计能力
	可靠性验证能力
体系	设计保证体系
	质量认证体系
	可靠性工作体系规划
	可靠性组织体系

由于民用飞机三类供应商主要是指标准件、原材料供应商,其中不涉及民用飞机系统的准则

和指标,因此,民用飞机三类供应商的选择准则和指标主要如表 2 所示。

表 2 基于可靠性、维修性和测试性的民用飞机三类  
供应商选择准则和评价指标

Table 2 Selection criteria and evaluation indicators of the  
third class of civil aircraft suppliers based on reliability,  
maintainability and testability

选择准则	评价指标
质量	产品合格率
	产品性能
	返修退货比率
	以往产品可靠性数据
服务	可靠性文件符合率
	现场工作支持情况
	试验支持
	担保年限
技术	生产能力
	设计能力
	可靠性验证能力
体系	设计保证体系
	可靠性工作体系规划
	质量认证体系
	可靠性组织体系
可靠性	平均故障间隔时间
	平均使用总寿命

### (1) 质量准则

大量研究表明,质量准则经常被列为供应商选择时的第一要素。质量准则可以参照以往供应商的产品合格率、产品性能、返修退货比率等。

### (2) 服务准则

供应商的服务质量会影响制造商对供应商的选择。在供应商选择过程中,主要从供应商以往工作中所体现的现场工作支持情况以及供应商所承诺的担保年限、试验支持等方面进行考虑。

### (3) 技术准则

供应商通常需要在项目研制初期就参与进来,因此其技术水平直接影响到产品的性能和飞机的整体性能。技术水平包括设计能力、生产能力、可靠性验证能力。

### (4) 体系准则

为确保供应商能够以合理高效的方式满足主制造商的要求,保证产品的质量和可靠性,应对供

应商提出可靠性相关的体系要求,包括设计保证体系和质量认证体系等。

(5) 可靠性准则

结合常用的可靠性参数和用户需求,主要考虑的产品可靠性指标有签派可靠度、航班可靠度、平均故障时间、平均非计划拆卸间隔时间、平均使用总寿命、机组报告故障率、失效率等。

(6) 维修性准则

在选择过程中,主要考虑的维修性指标包括平均修复时间、航线可更换单元更换时间、每飞行小时维修工时等。

(7) 测试性准则

可测试性能降低产品寿命周期费用,提前发现故障。测试性准则包括故障检测率、故障隔离率、虚警率、故障检测时间等。

由于三类供应商为原材料标准件供应商,出现问题时对产品直接进行更换,因此不需考虑维修性和测试性准则。

### 3 民用飞机供应商选择方法

供应商选择方法有定性方法<sup>[8]</sup>(如经验判断法、群决策法、协商选择法、招标采购法<sup>[9-10]</sup>等)、定量方法(如采购成本法<sup>[11]</sup>、ABC成本法、成本比率法、数据包络分析法、线性权重法、多目标数学规划法<sup>[12]</sup>等)、定性与定量相结合的方法(如层次分析法<sup>[13]</sup>、神经网络算法、模糊综合分析法<sup>[14]</sup>、遗传算法、TOPSIS方法<sup>[15-16]</sup>)。由于民用飞机供应商的选择受多种因素的影响,各因素之间的联系难以精确定量,因此单纯的定性或定量方法都难以做出合理准确的判断。层次分析法有机地结合了定性与定量因素,且计算简单易行,同时符合制造企业供应商选择评价体系的特点<sup>[17]</sup>,在航空领域受到了广泛应用及认可<sup>[18]</sup>,因此本文选用层次分析法(Antalytic Hierarchy Process, 简称 AHP)。

#### 3.1 AHP 概述

AHP 对复杂决策问题进行清晰的层次分解,将决策相关因素分解形成目标、准则、指标和方案等若干层次,并按照一定规则对每一层所包含的要素建立判断矩阵,采用数学方法计算得出权重。通过计算每个层次要素对总体目标的组合权重,

得出不同方案的权值,为选择最优供应商提供依据<sup>[19]</sup>。

#### 3.2 AHP 的基本流程

(1) 构造递阶层次

先确定目标层,再根据问题复杂程度将目标层分解为若干要素并建立从上而下的层次结构模型,最终得出方案层对目标层的优劣次序。层次结构如图 2 所示。

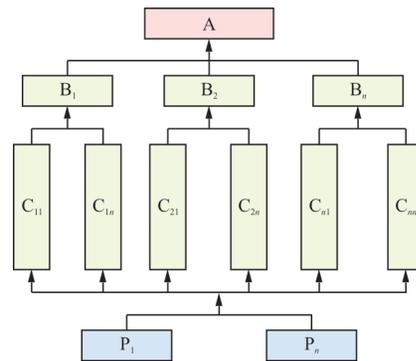


图 2 层次结构模型

Fig. 2 Hierarchical model

层次结构模型主要分为四个层次。

① 目标层 A: 表示要解决的问题或要达到的目标。

② 准则层 B: 表示为了达到总目标的因素,备选方案所涉及到的中间环节,即为供应商的产品质量、服务、技术等因素。

③ 指标层 C: 即准则层对应的子因素,如产品合格率等。

④ 方案层 P: 即所有供应商。

(2) 成对比较

建立层次结构模型后,进行各层次之间各要素的相互比较,实现定性与定量分析。比较的结果转换成矩阵为

$$A = \begin{matrix} \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1i} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2i} & \cdots & a_{2j} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & 1 & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & \vdots \\ a_{j1} & a_{j2} & \cdots & a_{ji} & \cdots & 1 & \cdots & a_{jn} \\ \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mi} & \cdots & a_{mj} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \\ (a_{ij})_{m \times n} \end{matrix} = \quad (1)$$

式中:元素  $a_{ij}$  为  $A_i$  与  $A_j$  之间比较的相对重要性。

判断矩阵  $A$  中的元素满足如下关系:

$$\begin{cases} a_{ii} = 1 \\ a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \end{cases} \quad (a_{ij} > 0) \quad (2)$$

(3) 对比尺标

AHP 一般使用 1~9 标度法,其每个数字及代表的含义如表 3 所示。

表 3 层次分析法 1~9 标注

Table 3 Annotation of AHP from 1 to 9

相对重要性权重	含义
1	同等重要
3	稍微重要
5	相当重要
7	明显重要
9	绝对重要
2,4,6,8	两相邻判断的折中值

(4) 计算各基准层指标权重方法

目前有三种常用的近似计算权重方法:和积法、方根法、幂法<sup>[20]</sup>。

(5) 计算判断最大特征值

可利用 Excel 表格中 MDETERM 函数语句和规划求解功能对最大特征值进行求解。

(6) 一致性与一致性检验

实际问题的复杂程度和对问题的认识深度可能导致判断矩阵中各要素之间的排序矛盾,从而影响矩阵的一致性。在 AHP 中,需要检验判断矩阵的一致性是否在可接受的范围内。

判断矩阵  $A$  的一致性指标(Consistence Index, 简称 CI)为

$$I_{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

式中: $\lambda_{\max}$  为判断矩阵的最大特征值。

由于判断矩阵的一致性随着标度不同而有所变化,基于此,萨迪教授引入了一致性比例(Consistence Ratio, 简称 CR)<sup>[21]</sup> 作为评价一致性的指标,即:

$$I_{CR} = \frac{I_{CI}}{I_{RI}} \quad (4)$$

随机一致性指标(Random Consistency Index, 简称 RI)如表 4 所示。当所求得的  $I_{CR} < 0.1$ , 则判断矩阵通过一致性检验,否则需重新修正判断矩阵。

表 4 平均随机一致性指标

Table 4 Average random consistency index

$n$	$I_{RI}$	$n$	$I_{RI}$
1	0	6	1.24
2	0	7	1.32
3	0.58	8	1.41
4	0.90	9	1.45
5	1.12	10	1.49

## 4 案例分析

### 4.1 构建多层次选择模型

以民用飞机氧气系统供应商为例,进行基于可靠性、维修性和测试性的供应商选择。氧气系统属于一类供应商,有 A、B 两个备选供应商。由于不同系统产品对应的供应商选择指标不同,从表 1 中选择适合氧气系统供应商的选择准则及指标,建立层次分析模型如图 3 所示。

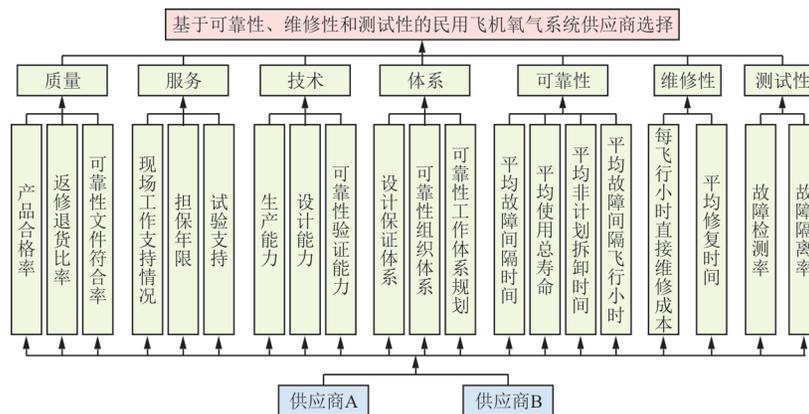


图 3 基于可靠性、维修性和测试性的氧气系统供应商选择模型

Fig. 3 The supplier selection model of oxygen system based on reliability, maintainability and testability

### 4.2 构造判断矩阵

以质量准则为例,通过打分构造其指标层对准则层的判断矩阵,如表 5 所示。

表 5 质量准则的判断矩阵表

Table 5 Judgement matrix sheet of quality criteria

质 量	产品合格率	返修退货比率	可靠性文件符合率
产品合格率	1	2	3
返修退货比率	1/2	1	3
可靠性文件符合率	1/3	1/3	1

根据式(1)、式(2)构造判断矩阵为

$$A_{\text{质量}} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1/2 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

表 6 基于可靠性、维修性和测试性的氧气系统供应商选择准则和指标权重

Table 6 Oxygen system supplier selection criteria and index weight based on reliability, maintainability testability

准则层	$w^{B-A}$	指标层	$w^{C-B}$	$w^{C-A}$	准则层	$w^{B-A}$	指标层	$w^{C-B}$	$w^{C-A}$
质量	0.359 1	产品合格率	0.632 7	0.227 2	技术	0.104 2	生产能力	0.588 9	0.061 3
		返修退货比率	0.192 4	0.069 1			设计能力	0.159 3	0.016 6
		可靠性文件符合率	0.174 9	0.062 8			可靠性验证能力	0.251 9	0.026 2
服务	0.087 3	现场工作支持情况	0.588 9	0.051 0	体系	0.055 9	设计保证体系	0.524 7	0.029 3
		担保年限	0.159 3	0.013 9			可靠性组织体系	0.333 8	0.018 6
		试验支持	0.251 9	0.022 0			可靠性工作体系规划	0.141 6	0.007 9
可靠性	0.211 6	平均故障间隔时间	0.461 7	0.097 7	维修性	0.033 3	每飞行小时直接维修成本	0.8	0.026 6
		平均使用总寿命	0.300 3	0.063 5			平均修复时间	0.2	0.006 7
		平均非计划拆卸时间	0.122 4	0.025 9	测试性	0.148 6	故障检测率	0.25	0.037 2
		平均故障间隔飞行小时	0.115 7	0.024 5			故障隔离率	0.75	0.111 5

### 4.4 方案评估

依次对供应商 A、B 的 20 项指标评分,构造判断矩阵,并计算权重。以“产品合格率”指标为例,打分结果及方案层 P 对指标层 C 的权重  $w^{P-C}$  如表 7 所示。

同理可得供应商 A、B 相对每一个指标的权重。方案层 P 对目标层 A 的组合权重为

$$w^{P-A} = w^{P-C} w^{C-A} \quad (5)$$

由此,获得两个备选供应商方案分别对决策

### 4.3 指标权重计算及一致性检验

对于判断矩阵  $A_{\text{质量}}$ ,最大特征值  $\lambda_{\max}$  为 3.009 2,一致性比率  $0.008 9 < 0.1$ ,满足一致性要求。

对其他准则进行相同的计算,并将其最大特征值对应的特征向量归一化,即可获得各个指标层 C 对准则层 B 的权重,表示为  $w^{C-B}$ 。同理,计算出准则层 B 对目标层 A 的权重,表示为  $w^{B-A}$ 。指标层 C 对目标层 A 的权重为  $w^{C-A}$ ,且  $w^{C-A} = w^{C-B} w^{B-A}$ 。

氧气系统供应商选择准则和指标权重如表 6 所示。

目标的排序权重,如表 8 所示,可以看出:在此案例中,供应商 A 的权重更高,表明在考虑可靠性、维修性和测试性的情况下最终选择 A 供应商。

表 7 产品合格率打分及权重表

Table 7 Product qualification rate scoring and weight

产品合格率	供应商 A	供应商 B	$w^{P-C}$
供应商 A	1	3	0.75
供应商 B	1/3	1	0.25

表 8 方案层中要素对应决策目标的权重  
Table 8 The weights of the elements in the scheme layer to the decision objectives

备选方案	权重
供应商 A	0.548 6
供应商 B	0.451 4

## 5 结 论

(1) 本文以氧气系统供应商为例,得到了该系统备选供应商在方案层、准则层及指标层的权重,确定了最佳氧气系统供应商。

(2) 本文提出的方法为民用飞机供应商的选择提供了不同选择视角,满足了现代民用飞机设计理念下对供应商选择的需求,具有一定的应用价值。

### 参考文献

- [1] DICKSON G W. An analysis of vender selection system and decisions[J]. Journal of Purchasing, 1966, 2(1): 5-17.
- [2] WEBER C A, CURRENT J R, BENTON W C. Vender selection criteria and methods[J]. European Journal of Operational Research, 1991, 50(1): 2-18.
- [3] 郭巧荣, 徐建新. 民机供应商质量保证体系的评价模型研究[J]. 航空维修与工程, 2012(3): 93-96.  
GUO Qiaorong, XU Jianxin. Research on the evaluation model of civil aircraft supplier quality assurance system[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2012(3): 93-96. (in Chinese)
- [4] 刘翔锋, 刘翔, 黄勇, 等. 基于层次分析法的供应商选择问题[J]. 成都信息工程大学学报, 2019, 34(2): 123-126.  
LIU Xiangfeng, LIU Xiang, HUANG Yong, et al. Supplier selection based on analytic hierarchy process[J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2019, 34(2): 123-126. (in Chinese)
- [5] 曹广生. “主制造商—供应商”模式下民机批生产能力评估流程研究[J]. 装备制造技术, 2017(5): 260-262.  
CAO Guangsheng. Research on production capacity of civil aircraft based on main manufacture-supplier model [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2017(5): 260-262. (in Chinese)
- [6] 曹鹏. 浅谈民机研制过程中的供应商管理程序[J]. 黑龙江科技信息, 2015(11): 142-143.  
CAO Peng. Talking about the supplier management procedure in the development of civil aircraft[J]. Heilongjiang Science and Technology Informance, 2015(11): 142-143. (in Chinese)
- [7] 邱峰. C公司供应商绩效评估及应用[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
- QIU Feng. Supplier performance evaluation of C company and its application[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [8] 赵恒志, 赵娟, 马宁. 基于对偶犹豫模糊集的供应商评选群决策模型[J]. 安徽工程大学学报, 2020, 35(2): 65-69, 77.  
ZHAO Hengzhi, ZHAO Juan, MA Ning. Supplier selection group decision model based on dual hesitant fuzzy sets [J]. Journal of Anhui Polytechnic University, 2020, 35(2): 65-69, 77. (in Chinese)
- [9] 王森. 供应商综合评价与选择方法研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2016.  
WANG Sen. Research on comprehensive evaluation and selection methods of suppliers[D]. Qingdao: Qingdao University, 2016. (in Chinese)
- [10] 黄明群. 基于协同质量链的供应商质量管理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.  
HUANG Mingqun. Study on the supplier quality management based on the synergic quality chain[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)
- [11] 李康. S电气制造公司作业成本法应用研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2019.  
LI Kang. Research on the application of ABC in S Electrical Manufacturing Company[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2019. (in Chinese)
- [12] WEBER C A, CURRENT J. A multi-objective approach to vender selection[J]. European Journal of Operational Research, 1993, 68: 173-184.
- [13] SATY T L, ALEXANDER J. Thinking with models: mathematical models in the physical, biological and social sciences[M]. London: Pergamon Press, 1981.
- [14] 柳嘉. 基于层次分析法和模糊综合评判法的螺杆泵企业的供应商选择[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.  
LIU Jia. Study on selection of pump company's supplier based on AHP and fuzzy synthetic evaluation[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017. (in Chinese)
- [15] 姚罗瑞, 马从安. 基于直觉模糊 TOPSIS 法的煤炭企业设备供应商选择研究[J]. 数学的实践与认识, 2020, 50(4): 288-294.  
YAO Luorui, MA Congan. Research on equipment supplier selection of coal enterprises based on intuitionistic fuzzy TOPSIS method[J]. Journal of Mathematics in Practice and Theory, 2020, 50(4): 288-294. (in Chinese)
- [16] 戎佳琦. A型民机项目原材料采购管理及应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.  
RONG Jiaqi. Raw material procurement management and application of type A commercial aircraft project[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015. (in Chinese)
- [17] 赵潮钢. 供应商选择和绩效评价研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.  
ZHAO Chaogang. Research on supplier selection and performance evaluation[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009. (in Chinese)