

引文格式: 刘志君, 梅晓萌, 胡中原, 等. 基于模糊综合评价的技术先进性评估[J]. 航空制造技术, 2026, 69(9): 25020268.

LIU Zhijun, MEI Xiaomeng, HU Zhongyuan, et al. Assessment of technological advancement based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(9): 25020268.

基于模糊综合评价的技术先进性评估

刘志君¹, 梅晓萌², 胡中原², 曹义华², 吕乐丰¹

(1. 中国航空研究院新概念飞行器技术研究所, 北京 100029;

2. 北京航空航天大学, 北京 100191)

[摘要] 针对航空器技术先进性评价中多维度、多指标的综合评估需求, 提出一种基于组合赋权和模糊综合评价的航空器技术先进性评价方法。该方法结合专家意见, 利用评语集建立分级评价准则, 从技术竞争力、技术成熟度、效费比、技术标准 4 个维度构建评价体系; 再结合模糊层次分析法和熵权法对各个指标赋权, 利用隶属度函数对指标进行模糊化处理; 最后运用矩阵运算实现多方面综合评分。固定翼和旋翼机的实例结果表明, 该方法可对航空器设计中的技术先进性进行定量评估, 并为研发优先级顺序提供参考, 具有很高的科学性与工程实用性。

关键词: 技术先进性; 航空器先进技术; 效费比; 技术成熟度; 评价体系

中图分类号: V22

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25020268

Assessment of Technological Advancement Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation

LIU Zhijun¹, MEI Xiaomeng², HU Zhongyuan², CAO Yihua², LÜ Lefeng¹

(1. New Concept Aircraft Technology Reserach Institute, Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100029, China;

2. Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] To address the need for comprehensive assessment involving multi-dimensional and multi-index evaluations in the assessment of aircraft technological advancement, this paper proposes an evaluation method for aircraft technological advancement based on combined weighting and fuzzy comprehensive evaluation. This method establishes hierarchical evaluation criteria by incorporating expert opinions and using a rating set, and constructs an evaluation system from four dimensions: Technical competitiveness, technological maturity, cost-effectiveness ratio, and technical standards. Furthermore, it combines the fuzzy analytic hierarchy process and the entropy weight method to assign weights to each index, employs membership functions to fuzzify the indicators, and finally achieves comprehensive multi-dimensional scoring through matrix operations. Case study results on fixed-wing and rotary-wing aircraft demonstrate that this method can provide a reference for the quantitative assessment of technological advancement and the ranking of research and development priorities in aircraft design, with high scientific validity and engineering practicability.

Keywords: Technological advancement; Advanced aircraft technologies; Cost-effectiveness ratio; Technological maturity; Evaluation system

航空技术已从早期单一机械结构逐渐发展为多学科融合的系统工程。高性能发动机、复合材料、航电系统等先进技术在航空工业中的广泛应用, 极大地提升了航空

器飞行性能。例如, 国产大型客机 C919 在研制过程中大量采用了钛合金增材制造零件、模块化航空电子设备等先进技术^[1-2]。多学科技术的融合也衍生出先进技术

收稿日期: 2025-08-20; 退修日期: 2025-11-13; 录用日期: 2025-12-25

通信作者: 曹义华, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事旋翼机气动性能研究、效能评估, 直升机总体设计。

在航空工业中适用性评估这一重要课题。特别是歼-35、C919 等飞机的成功研制标志着国产先进机型已步入世界先进水平,因此亟须建立一套符合航空器制造水平,兼顾技术先进性、经济性与适用性的综合评价体系。

现有的技术先进性评估体系多数只考虑技术竞争力、技术成熟度、效费比、技术标准中的单一维度。例如,蓝元沛等^[3]提出关于技术成熟度的评价方法,对复合材料在飞机结构应用的技术成熟度进行了定量分析,为如何选取复合材料提供依据;赵楠^[4]将经济性指标作为飞机性能参数迭代过程中的目标函数之一,同时考虑气动、可靠性等指标,构建了一个多维度的技术评估体系。

在先进技术应用于航空器的过程中,国内学者多数从技术成果、衍生效益、研发周期和潜在风险 4 个方面定量分析不同技术的先进性等级^[5]。例如,王钰莹等^[6]在 5 个维度上建立核心技术创新能力评价指标体系;西北工业大学李寿安等^[7]从敏感性和易损性构建飞机生存力评价指标体系,通过影响矩阵和协商定权法评估先进技术对航空器生存能力的影响。

目前国内外公开文献中少有针对航空器技术先进性评价问题的研究,已有的评价体系研究大多采用模糊综合评价法。何珊^[8]基于构建的层次分析法-模糊综合评价法复合评价模型,开发了通用航空产业高质量发展评价系统;陈蓓蓓等^[9]运用层次分析法来确定航空产业链的重要度权重,并初步分析我国通用航空制造业的发展模式。

模糊综合评价法能够实现对抽象评估对象的定量评价,较为直观地对受多因素、多条件影响制约的对象进行评估。但是在评价过程中,专家对隶属度进行赋值会导致评议的主观性较强。因此以模糊层次分析法和熵权法对指标赋权进行改进,同时兼顾各行业的实际情况,可增强其合理性与科学性。

综上所述,本文将从技术竞争力、技术成熟度、效费比、技术标准 4 个维度构建航空器技术先进性评价指标体系,引入客观评价准则对各维度指标进行分级评价,并根据隶属度理论建立关于以上评估指标的模糊关系矩阵,优化传统模糊综合评价模型,建立航空器技术先进性的多维度的综合分析方法。

1 航空器技术先进性评价指标体系建立

航空器技术先进性评价体系与其他项目的评价体系截然不同,为确保评价标准的科学性和合理性,在构建评价体系的初始阶段,评价方案至关重要。

1.1 航空器技术先进性评价方案

航空器技术先进性评价流程如图 1 所示。本文构建航空器技术先进性评价体系主要分为 4 部分:(1)建

立航空器技术先进性多维度指标体系;(2)基于组合赋权和模糊综合评价算法,构建航空器技术先进性评估方法;(3)建立二级指标客观评价规则;(4)选取固定翼和旋翼飞机先进技术作为实际案例,采用层次分析法做评价结果对比,验证评价体系的合理性、科学性。

1.2 基于先进技术应用案例的多维度评价指标体系

由于旋翼机和固定翼飞机应用最广泛,复合翼、仿生机等机型仍处于验证阶段,因此在建立技术先进性评价指标体系时只需重点考虑这两种机型。尽管这两种机型在结构强度设计、飞行原理和气动设计方面有很大区别,但是在技术先进性的评价过程中又具有一定相似性^[10]。例如,直升机和客机都运用了大量的复合材料和航电系统,因此可以将两者统一起来建立评价指标体系。

目前,航空器工程已逐渐向电气化与智能化发展,涉及复合材料、飞控算法、结构轻量化和总体设计等多个关键领域。航空器的性能获得了大幅度的提升,然而在多学科融合和效费比等方面仍面临瓶颈。因此航空器技术先进性评价指标体系需以先进技术的性能参数和技术转化为核心,结合其实际应用案例和现有评价体系进行构建。

从 20 世纪 70 年代起,美欧国家开展了一系列先进复合材料研究,解决了复合材料在航空器应用中面临的诸多问题^[11]。迄今为止,复合材料已经广泛应用于各类结构与功能部件。相较于铝合金材料,复合材料具有密度低、比模量高、耐腐蚀和易于成型等优点,对航空器结构的快速设计、减重降本、维修维护、使用周期等提供了极大的助力。

航电系统直接关系到飞机运行的安全可靠,目前大多数飞机使用综合航电系统^[12],主要由软件综合集成技术、硬件平台设计技术、数据总线传输技术、系统仿真试验技术 4 部分组成。综合航电系统可以合理地整合功能、系统技术,提升飞机系统的可靠性,减轻电子设备的质量,便于后期的维护和迭代升级。

技术竞争力维度体现在航空器性能的升级优化,可

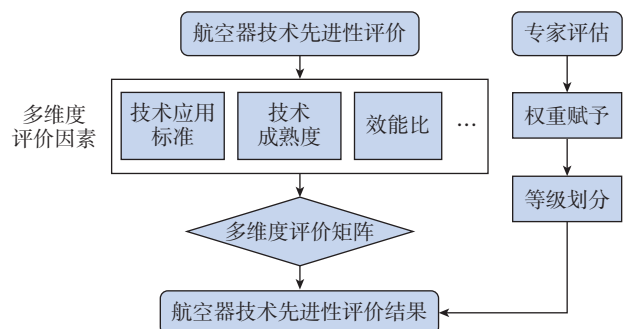


图 1 航空器技术先进性评价流程
Fig.1 Evaluation process of aircraft technological advancement

以总结为技术代差、创新性、专利技术、特殊技术和自主研发能力这 5 个二级指标。技术的效费比维度需从航空器全寿命周期视角进行评估,包括研发成本、生产成本、运营维护成本和成果价值等。

航空器技术先进性受两方面的限制:一是技术成熟度,需按照 NASA 技术成熟度模型或者按照国标 GB/T 22900—2022 进行准确分级^[13];二是技术标准,需满足 FAA/CAAC (美国联邦航空局/中国民用航空局)等适航条款中关于技术安全冗余与系统鲁棒性的强制要求。这部分涉及 4 个二级指标:技术规范、适航标准符合性、航空器环保适航及航空器性能。

综上所述,评价指标体系如图 2 所示,可以分为 4 个维度,写为 $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4\}$, U_1 为技术竞争力; U_2 为技术成熟度; U_3 为效费比; U_4 为技术标准。技术竞争力包括技术代差、创新性、专利技术、特殊技术、自主研发能力 5 个二级指标;效费比包括研发成本、生产成本、运营维护成本、成果价值 4 个二级指标;技术标准包括技术规范、适航标准符合性、环保适航指标、航空器性能指标 4 个二级指标。

2 航空器技术先进性评价模型

2.1 航空器技术先进性评价准则

为了创建航空器从研发到应用整个阶段的先进技术适用性评价准则,需要进一步制定各个维度下的评价准则。

在技术竞争力维度,技术代差通过对比国内外同级别技术的先进程度,以技术所处的先进性层级实现评级;创新性等级从理论创新、工程应用及产业升级 3 个层面进行评估;专利技术依据专利数量、论文产出及专著成果等维度进行评级;特殊技术以保密等级、应用限制等因素作为核心评级标准;自主研发能力是衡量航空科技创新水平的关键指标,体现了核心技术的自主开发研制程度,对于评估技术先进性至关重要^[14]。

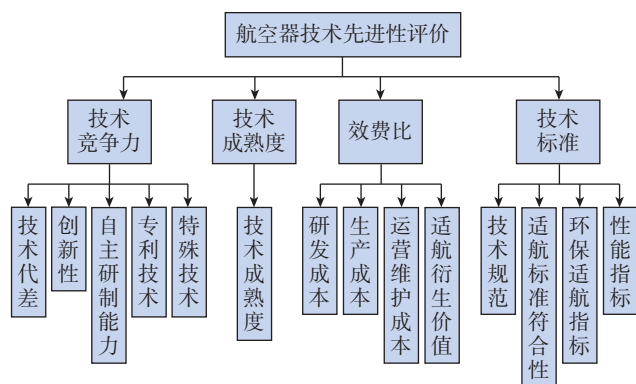


图 2 民机技术适用性评价指标体系

Fig.2 Evaluation index system for technical applicability of civil aircraft

在技术成熟度维度,综合考虑了 NASA^[15]、国标^[16]等文件中对技术成熟度的定义,给出了技术成熟度评级准则,如表 1 所示。

在效费比方面,传统的整机效费比计算方法存在一定局限性:一方面无法精准反映技术的先进程度;另一方面未能全面覆盖航空器的全生命周期。因此,效费比评价准则需结合直接运营成本 (TOC) 与航空器全生命周期各阶段的特点进行制定。韩晓玲^[17]给出了民用飞机选型经济评估数学模型;李晓勇等^[18]给出了民用飞机全寿命周期效费比的模型,具体构成如图 3 所示。

全寿命周期包括非重复成本 (NRC) 和单机成本^[19],根据 NASA 的相关研究,非重复成本与航空器的空重及部件有一定关联^[20-21],因此可通过部件与重量的变化对其进行分级评价。单机成本主要聚焦生产体系兼容性^[22]:工业制造设备的转化能力、原材料消耗率及劳动量数量改变。

效费比不仅反映成本水平的变化,还反映了其对任务完成能力和运营效能的综合提升。装载能力、航程能力、巡航高度、起降场长适应性及单位座公里油耗等指标直接决定飞机在既定航线条件下能够产生的运输周

表 1 技术成熟度评价准则

Table 1 Evaluation criteria for technological maturity

等级	等级判断定义
1	提出基本原理,研究成果获得公认
2	依据相关技术原理,提出明确的技术应用方案
3	技术应用方案的关键功能或特性通过了分析与实验室证实,主要功能单元(实验室样品)得到了实验室验证
4	部组件或原理样机的功能在实验室环境下得到验证
5	通过模拟使用环境,验证部组件、分系统级原理样机的关键功能
6	分系统或系统级工程样机的关键功能和主要性能在模拟使用环境下得到验证
7	原型机的性能在实际使用环境中得到验证
8	实际系统通过测试验证了实际系统“飞行合格”
9	实际系统成功执行飞行任务

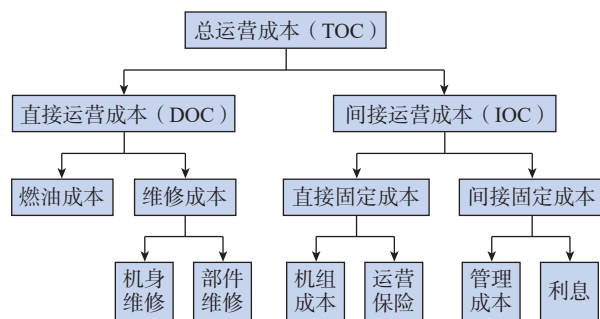


图 3 民用飞机基本飞行成本模型^[18]

Fig.3 Basic flight cost model for civil aircraft^[18]

转量和收益水平^[23]。飞机全寿命周期经济分析的本质是在成本、性能和风险三维度之间寻求平衡,在一定生命周期成本约束下实现尽可能高的性能与任务成功率,先进技术对于提升航空器效能起着决定性的作用,包括运输/运营效能^[24]、可靠性^[25]、保障性^[26],以及安全环保能力^[27]等。因此效费比是评价技术在航空器中应用是否合理的重要指标。

在技术标准上,技术规范的评价基准主要取决于先进技术与行业条款的契合度,目前没有相关的技术规范条款,因此参考相似技术的规范给予此项“及格”等级。这是因为新技术在标准化进程与适航认证中客观存在滞后性,因此“及格”水平是合理的。另外,新技术在技术标准维度即使表现平庸,其技术前沿性、性能突破等核心优势仍能形成竞争力补偿,从而保障总体评估结果的客观性。适航标准的符合性评价需根据技术方案对适航条款的覆盖程度进行分级判定;环保性要求主要依据技术应用于航空器后排放、噪声等指标进行评级;航空器性能指标能直接评判航空器技术先进性,体现了关键技术参数相较于同类技术的领先水平。

2.2 评价指标的组合赋权

2.2.1 基于模糊层次分析法的权重

层次分析法 (Analytic hierarchy process, AHP) 由 Saaty^[28] 提出,旨在根据不同决策要素的内在关系,建立层次划分的模型,对问题进行定性或定量的分析。二模糊层次分析法在层次分析法的基础上引入了模糊一致矩阵决策方法^[29],以此来改进其主观性强、一致性检验难以满足的问题^[30-32]。

在模糊判断矩阵中,各元素取值反映了同一准则层下各因素间的相对重要程度,即在评价体系的某一特定维度内,通过两两比较的方式量化不同二级指标对该维度目标的权重或优劣差异。将两因素根据表 2 中的标度方法进行比较^[33],建立 $n \times n$ 阶模糊判断矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} \end{bmatrix}, (i, j=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

模糊判断矩阵为模糊互补矩阵^[34],满足:

$$\begin{cases} a_{ij} + a_{ji} = 1 \\ a_{ii} = 0.5 \end{cases} \quad (2)$$

根据模糊互补判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 的排序算法,计算权重向量 $W=(w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 满足:

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} + \frac{n}{2} - 1}{n(n-1)} \quad (3)$$

由此推理,当有 m 名专家参与决策,则由模糊一致矩阵 $\tilde{R}=(\tilde{r}_{ij})_{n \times n}$ 求得的权重向量 $W_F=(w_{f1}, w_{f2}, \dots, w_{fn})^T$ 满足:

$$w_i = \frac{\sum_{u=1}^m \sum_{j=1}^n \lambda_u a_{ij} + \frac{n}{2} - 1}{n(n-1)} f'_{ij} = \frac{f_{ij} - \min(F(:, j))}{\max(F(:, j)) - \min(F(:, j))} + Cw_j = \frac{h_j}{\sum_{j=1}^n h_j} \quad (4)$$

式中, λ_u 为第 u 位专家的权重 ($u=1, 2, \dots, m$), $\tilde{r} = \sum_{u=1}^m$

$\lambda_u a_{ij}$, $\lambda_u > 0$ 且 $\tilde{r} = \sum_{u=1}^m \lambda_u = 1$, \tilde{r} 为模糊一致矩阵元素和对于权重的乘积之和; C 为坐标平移量; h_j 为差异化系数; f_{ij} 为原始的评价指标值; f'_{ij} 表示熵权法中第 j 个指标,第 i 位专家评分的归一化值; $\min(F(:, j))$ 为隐式极值。

模糊判断矩阵的一致性可以使用相容性指标来检验:

$$I(A, W) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |a_{ij} + w_{ji} - 1| \quad (5)$$

当相容性指标 $I(A, W) \leq \alpha$ ($\alpha=0.1$) 时,可认为是一致的, α 表示相容性检验阈值。

当有 m 名专家参与决策,则需进一步满足:

$$\begin{cases} I(A_k, W_k) \leq \alpha \\ I(A_t, A_p) \leq \alpha \end{cases} (k, t, p=1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

式中, k, t, p 为专家编号索引。

2.2.2 熵权法权重

熵权法主要基于信息熵进行赋权,当信息的混乱程度越大,其信息熵值越小,权重越大。反映到指标权重中,即专家对某项指标的评价变异程度越大,其权重越高,可以较为客观地反映指标权重。

首先根据指标重要性评估,建立评估矩阵

表 2 标度方法
Table 2 Scaling methods

标度	含义
0.9	A 元素极端重要于 B 元素
0.8	A 元素强烈重要于 B 元素
0.7	A 元素明显重要于 B 元素
0.6	A 元素稍微重要于 B 元素
0.5	A 元素与 B 元素同等重要
0.4	与标度 0.6 相反, B 元素稍微重要于 A 元素
0.3	与标度 0.7 相反, B 元素明显重要于 A 元素
0.2	与标度 0.8 相反, B 元素强烈重要于 A 元素
0.1	与标度 0.9 相反, B 元素极端重要于 A 元素

$F=(f_{ij})_{m \times n} (i=1,2, \dots, m; j=1,2, \dots, n)$ 。

由于在评分只存在正向评价,因此仅考虑正向指标下对评估矩阵的归一化处理:

$$f'_{ij} = \frac{f_{ij} - \min(F(:, j))}{\max(F(:, j)) - \min(F(:, j))} + Ch_j = 1 - e_j \quad (7)$$

考虑到当 f'_{ij} 值为0时,后续的对数运算可能无意义,此处取坐标平移量 $C=1 \times 10^{-3}$ 。根据归一化后的矩阵可计算信息熵值:

$$\begin{cases} e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \\ p_{ij} = \frac{f'_{ij}}{\sum_{i=1}^m f'_{ij}} \end{cases} \quad (8)$$

式中, p_{ij} 表示特征比重,代表在第 j 个指标下,第 i 个专家的评分在整体评分中所占的比重。

差异化系数为

$$h_j = 1 - e_j \quad (9)$$

指标对应权重 $W_E = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T$ 为

$$w_j = \frac{h_j}{\sum_{j=1}^n h_j} \quad (10)$$

2.2.3 组合权重

由于模糊层次分析法计算仍缺乏客观性,而熵权法的计算只分析数据本身,无法考虑指标本身的特性,因此将两者结合。

根据上文求得模糊层次分析法权重 W_F 、熵权法权重 W_E ,则各项指标的几何平均权重表示为 $W^* = (w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)^T$ 。

$$w_i^* = \frac{\sqrt{w_{Fi} w_{Ei}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{w_{Fi} w_{Ei}}} \quad (11)$$

式中, w_{ei} 为基于熵权法得到的客观权重。

2.3 航空器技术先进性模糊综合评价

对于航空器技术先进性采取模糊综合评价法进行评价,具体实施步骤如下。

(1) 构建因素集及评语集。

评语集是结合专家的评估意见,对评价对象进行分级评判的标准。本文结合航空领域的多名专家评分,将技术先进性指标的评语集划分为9级标准。将这9级标准的评价区间设计为12~100的分值,各级评语对应的分数集为 $C=(12, 24, 36, 48, 60, 70, 80, 90, 100)$ 。各个分数与等级的对应关系:评分低于60分判定为“不适用”技术;60~70分为“及格”等级,70~80分为“良好”等级;80~100分为“优秀”等级。

(2) 构建模糊矩阵并进行评价。

依据评价准则进行评价时,部分评价指标因固有模

糊性或数据局限性无法利用评语集量化处理,针对此类指标,需通过构建映射关系实现等价转换,以适配预设的评价体系。

$$M(v_i) \rightarrow V \quad (12)$$

映射处理后,采用等差三角形分布函数对各级评语进行模糊化处理,从而建立因素评语等级与先进性之间的隶属关系。指标值 x 对第 i 个等级的隶属度函数为

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 0, x < c_{i-1} \text{ 或 } x > c_{i+1} \\ x + 1 - c_i, c_{i-1} \leq x \leq c_i \\ x - c_i, c_i < x \leq c_{i+1} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $c_i=1, 2, \dots, 9$ 且 $c_i - c_{i-1}=1$,表示三角形隶属度函数的节点。

根据上述评价准则,系统评估各指标对技术先进性的影响权重,并对评价结果实施模糊化处理。整合隶属关系构建模糊评价矩阵 R ,该矩阵表征了各评价指标与评语等级之间的模糊映射关系,为综合评价提供数据支撑。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1j} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{i1} & r_{i2} & \dots & r_{ij} \end{bmatrix}, (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (14)$$

式中, r_{ij} 为 U_i 中因素 u_{ij} 对应 V 中的隶属关系。

本方案中选取的模糊评价算子为矩阵乘法,适用性评价的评价向量 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$ 可由式(15)计算。

$$B = W \times R \quad (15)$$

则综合评判结果 B 与评价等级分数 C 的综合评价结果 p 为

$$p = B \times C \quad (16)$$

通过模糊综合评价模型的构建,明确从“因素集、评语集构建、模糊矩阵生成、组合权重计算、综合评分输出”的完整评价链。

3 算例验证分析

为验证本文评价方法的综合性,选取应用最为广泛的两类航空器:固定翼飞机和旋翼机,并选取来自不同领域的前沿技术、现役技术和被淘汰技术对上述评价模型进行验证分析。同时选取层次分析法对相同的技术进行评价,得出的评分结果与本文的综合评价方法进行对比,验证本文综合评价方法的科学性、先进性。

3.1 评价指标数据来源确定

为验证前文构建的评价模型在不同机型、不同技术类型中的适用性,本节首先明确算例选取的原则与数据来源,再基于组合赋权法计算指标权重,为后续技术评价提供依据。算例选取的先进技术覆盖材料、结构、航电、控制、动力等核心技术领域,技术样本满足以下原则。

(1) 技术成熟度全覆盖。选取技术成熟度1~3级

的探索技术,4~6 级的研发技术,7~9 级的应用技术,覆盖 NASA 技术成熟度模型的全区间^[34],可验证模型对不同发展阶段技术的评价能力。

(2) 工程应用代表性。固定翼飞机中,纳米碳纤维复合材料、形状记忆合金结构件等已成为 C919、歼-35 等国产先进机型的关键应用技术。这类材料凭借高强度、高抗疲劳性等优势,成为现代航空器轻量化设计的核心选择。在旋翼机技术中,智能变距共轴双旋翼技术等是直升机升级换代的核心技术,其性能直接影响旋翼机的操纵性与可靠性^[35],确保评价对象与航空工业实际研发重点一致。

(3) 数据可获得。所有技术的参数数据均来自公开文献或行业报告,如复合材料的密度、比模量等性能参数参考航空材料领域期刊的实测数据,航电系统的可靠性指标引自航电技术专项研究成果^[36],经费比相关的研发成本、运营维护成本则基于民用飞机全寿命周期成本模型计算得出^[37],确保数据真实可靠。

3.2 评价指标权重确定

根据组合赋权法的计算原理,对 4 个一级指标进行综合评估。基于 10 位航空领域专家(4 名高校教授、6 名航空研究院工程师)的打分,依据模糊层次分析法进行指标权重的计算。模糊判断矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.4 & 0.6 \\ 0.4 & 0.5 & 0.3 & 0.4 \\ 0.6 & 0.7 & 0.5 & 0.6 \\ 0.4 & 0.6 & 0.4 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (17)$$

根据上述权重计算方法,可得一级指标权重 W_{f0} :

$$W_{f0} = [0.262 \quad 0.201 \quad 0.302 \quad 0.237] \quad (18)$$

对结果进行一致性检验, $I=0.0067$, 小于 0.1, 符合标准。其余二级指标计算与此相同。

根据熵权法对权重指标进行计算,主要采用 9 级标度,可得指标权重 W_{e0} :

$$W_{e0} = [0.248 \quad 0.214 \quad 0.299 \quad 0.239] \quad (19)$$

其余二级指标计算与此相同,对两者计算的权重进行加权平均计算。一级及二级指标最终权重如表 3 和 4 所示。

综上所述,4 项指标的优先级排序分别为效费比、技

表 3 一级指标权重计算结果

Table 3 Calculation results of first-level index weights

一级指标	权重
技术竞争力 U_1	0.255
技术成熟度 U_2	0.207
效费比 U_3	0.300
技术标准 U_4	0.238

术竞争力、技术标准、技术成熟度,与实际情况基本符合。

3.3 固定翼飞机技术先进性评估

在固定翼飞机技术先进性评估中,本文选取了处于不同发展阶段、不同领域的技术进行评估,包括复合材料、航电系统、气动布局等。这些技术中既有已完全应用于航空器总体设计的成熟技术,也包含部分转化的技术成果,各技术名称及计算得分如表 5 所示。具体的一级指标得分如图 4 所示。

分析固定翼飞机先进技术评估得分结果,当前核能动力技术尚未进入工程样机阶段,在关键材料、屏蔽和安全控制技术方面均远未成熟,因此该技术不适合应用在航空器上,这一判断合理且符合技术发展现状。铝合

表 4 二级指标权重计算结果

Table 4 Calculation results of second-level index weights

二级指标	主观权重	客观权重	组合权重
技术进步 U_{11}	0.064	0.055	0.060
技术创新 U_{12}	0.056	0.057	0.057
专有技术 U_{13}	0.056	0.057	0.057
特殊技术 U_{14}	0.091	0.066	0.077
自主研发能力 U_{15}	0.067	0.059	0.063
技术成熟度 U_{21}	0.218	0.210	0.215
研发成本 U_{31}	0.081	0.084	0.083
制造成本 U_{32}	0.076	0.077	0.077
运行成本 U_{33}	0.086	0.077	0.081
技术溢出效应 U_{34}	0.061	0.061	0.061
技术规范 U_{41}	0.074	0.084	0.079
适航标准符合性 U_{42}	0.085	0.091	0.088
民机环保性要求 U_{43}	0.054	0.082	0.067
性能指标 U_{44}	0.071	0.086	0.078

表 5 固定翼飞机技术评估得分

Table 5 Technical evaluation scores of fixed-wing aircraft

项目名称	组合赋权-模糊综合评价法得分	AHP 得分
纳米碳纤维复合材料	83.49	73.34
形状记忆合金结构件	89.16	67.50
铝合金机身	74.75	92.26
高超声速技术	88.11	60.81
可变形自适应机翼技术	70.46	65.50
翼身融合气动布局	89.67	78.50
主动流动控制翼梢小翼	83.58	78.86
核能动力技术	57.92	46.35

金机身技术虽不具备复合材料的高性能,但其工艺成熟、成本低,因此在评估中处于“良好”区间。高超音速技术现成为判断航空器总体性能的核心标志,广泛用于军用战斗机中。中国在2020年成功试飞了超燃冲压发动机验证机,成为继美国之后第2个实现高超音速自主飞行试验的国家^[38],评分稳居“优秀”行列。其余参评技术评分也与行业发展现状高度契合,充分验证了本评估体系的科学性与有效性。

从上述结果可以看出,传统AHP方法得出的评分与本文采用组合赋权模糊评价结果存在显著差异。首先,AHP法具有较强的主观性,其权重依赖专家比较给出,可能低估某些新兴技术的重要性。例如,在AHP评分中,形状记忆合金结构件、高超音速技术等新技术由于成熟度不足被专家赋予较低分值,得分仅约60左右,处于“良好”水平;而传统技术“铝合金机身”因成熟度高、成本低,AHP评分远高于部分新技术。

3.4 旋翼机技术先进性评估

旋翼机技术先进性评估参考固定翼的选取方式,也同样涵盖材料、结构、导航、气动、控制、系统等方面,各技术名称及计算得分如表6所示。具体的一级指标得分如图5所示。

分析旋翼机评估得分结果,连续纤维增韧陶瓷基材料凭借高强度、低密度和耐高温的优点,国内外将其视为新一代航空材料的研发热点^[39],可以判定处于“优秀”区间。直升机数字孪生系统可实现飞行数据采集与仿真分析,在提高运维效率方面前景可观^[40],但由于存在

很高的数据泄漏风险,目前其技术和安全成熟度尚不足以评为“优秀”。综上所述,本文构建的评估体系能够有效反映各技术在旋翼机领域的先进性与应用潜力。

旋翼机采用AHP法评估时,有多项技术评分相近,导致评价排序不够鲜明。例如,连续纤维增韧陶瓷基机身在组合赋权-模糊评价中被评为“优秀”区间;相比之下,AHP法因过度考虑其当前成熟度,使其总分仅约65分。主动气动弹性旋翼控制等创新技术在AHP传统评估仅给出57分,但是主动气动弹性旋翼控制在高

表6 旋翼机技术评估得分
Table 6 Technical evaluation scores of rotorcraft

项目名称	组合赋权模糊综合评价法得分	AHP得分
共轴双旋翼高速直升机技术	81.18	73.11
直升机电液复合飞控系统	74.65	85.62
主动气动弹性旋翼控制技术	80.41	57.00
碳陶复合柔性桨毂技术	83.49	78.93
仿生蜂窝结构桨叶技术	85.03	82.13
高性能倾转旋翼机技术	77.20	72.36
连续纤维增韧陶瓷基材料机身	88.18	65.18
超疏水抗磨涂层技术	78.28	92.33
直升机预测性维护数字孪生系统	77.34	67.06
多波段隐身吸波技术	82.45	62.15

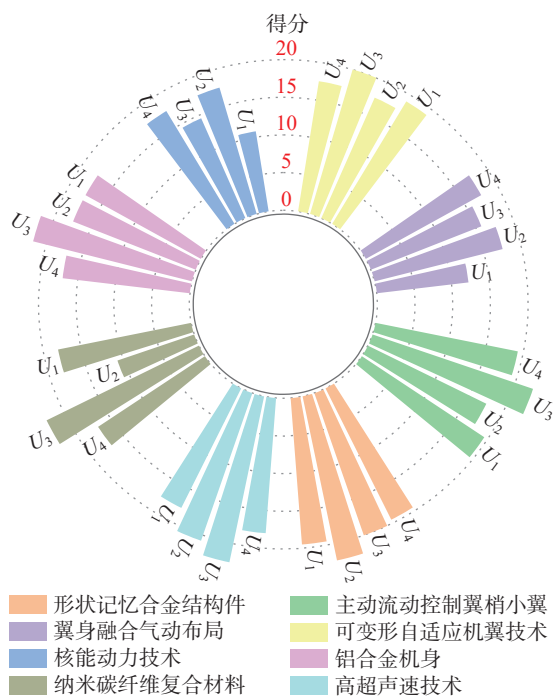


图4 固定翼飞机指标评估得分
Fig.4 Index evaluation scores of fixed-wing aircraft

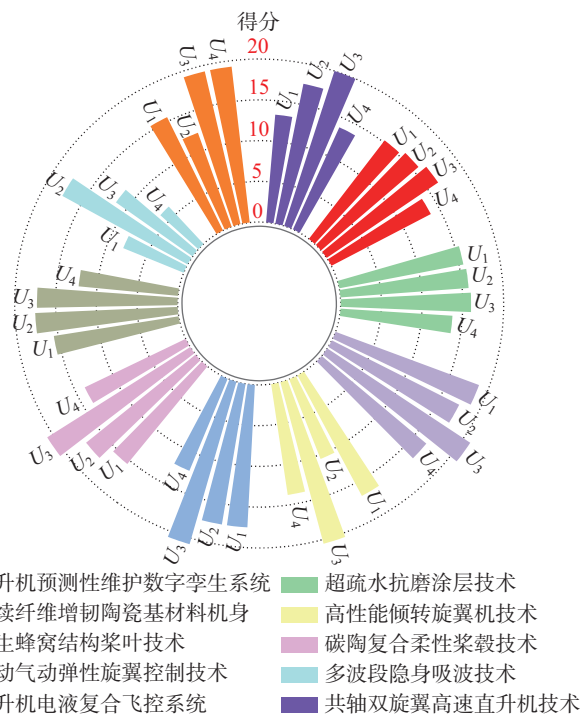


图5 旋翼飞机指标评估得分
Fig.5 Index evaluation scores of rotorcraft

性能直升机的旋翼设计上不可或缺,拥有极高的战略发展价值^[41]。综上所述,相较于传统的层次分析法,本文的组合赋权法和模糊综合评价法所得评价结果层次分明,也更为合理。

4 结论

(1) 针对航空器的技术先进性评估方法,本文从技术竞争力、技术成熟度、效费比以及技术标准4个维度展开,构建了航空器技术先进性评价模型并进行验证分析。

(2) 为提高评估结果的科学性和合理性,采用组合赋权法和改进型模糊综合评价法,融合了定量分析和定性判断,同时根据飞机全寿命周期成本、国家标准的计算框架,构建了一套科学严谨的评价准则。

(3) 选取旋翼机和固定翼飞机具有代表性的先进技术作为算例,以专家赋予的权重作为出发点,构建模糊矩阵,再通过计算得出各先进技术的评估分数,本文方法的计算结果与实际应用场景相符。证明该评价方法可在技术选型、研发优先级排序及资源分配中提供科学依据,为先进技术应用于航空器提供一定的参考。

(4) 传统AHP法存在主观偏差大、难以充分刻画技术优劣差异等问题,本文方法在同一实例下获得了更符合实际的评价排序和更明显的评分结果,能够突出真正具有发展价值的技术。本文方法在创新性和实用性上更具优势,不仅评价过程更科学严谨,结果更客观合理,而且有助于为技术选型和研发决策提供可靠依据,从而体现出更高的工程应用价值。

参考文献

[1] 司瑞,陈勇.民用飞机增材制造技术应用发展趋势[J].航空学报,2024,45(5):70-89.

SI Rui, CHEN Yong. Application trends of additive manufacturing technology for civil aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(5): 70-89.

[2] 张婷.高性能热塑性复合材料在大型客机结构件上的应用[J].航空制造技术,2013,56(15):32-35.

ZHANG Ting. Applications of high performance thermoplastic composites for commercial airplane structural component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(15): 32-35.

[3] 蓝元沛,关志东,孟庆春.复合材料飞机结构技术成熟度评价方法[J].复合材料学报,2010,27(3):150-154.

LAN Yuanpei, GUAN Zhidong, MENG Qingchun. Evaluation method for technology maturity of composite aircraft structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(3): 150-154.

[4] 赵楠.民用飞机经济性设计方法及其在新技术评估中的应用[D].上海:上海交通大学,2014.

ZHAO Nan. Civil aircraft design for economics methology and its application in new technology assessment[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.

[5] HUANG C C, CHU P Y, CHIANG Y H. A fuzzy AHP application

in government-sponsored R&D project selection[J]. Omega, 2008, 36(6): 1038-1052.

[6] 王钰莹,原长弘,宋茜.制造业领军企业关键核心技术创新能力评价指标体系初探[J].中国科技论坛,2024(10):141-151.

WANG Yuying, YUAN Changhong, SONG Qian. A preliminary study on the evaluation index system of leading manufacturing enterprises' key-core technology innovation capability[J]. Forum on Science and Technology in China, 2024(10): 141-151.

[7] 李寿安,宋笔锋,李东霞,等.飞机生存力设计技术评价及选择方法研究[J].电光与控制,2008,15(7):26-29,38.

LI Shouan, SONG Bifeng, LI Dongxia, et al. A method for technology evaluation and selection of aircraft survivability design[J]. Electronics Optics & Control, 2008, 15(7): 26-29, 38.

[8] 何珊.通航产业高质量发展评价指标体系及系统设计研究[D].广汉:中国民用航空飞行学院,2022.

HE Shan. Research on evaluation index system and system design of high-quality development of general aviation industry[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2022.

[9] 陈蓓蓓,程凯.基于AHP方法的我国通用航空发展产业链分析[C]//航空航天科技创新与长三角经济转型发展分论坛论文集.上海:2012:212-217.

CHEN Beibei, CHENG Kai. Analysis of China's general aviation development industry chain based on AHP method[C]//Proceedings of the Sub-forum on Aerospace Science and Technology Innovation and Economic Transformation and Development of the Yangtze River Delta. Shanghai: 2012: 212-217.

[10] 吴希明,牟晓伟.直升机关键技术及未来发展与设想[J].空气动力学学报,2021,39(3):1-10.

WU Ximing, MOU Xiaowei. A perspective of the future development of key helicopter technologies[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2021, 39(3): 1-10.

[11] 徐林,刘传军,赵崇书.复合材料在民用飞机应用与发展趋势[J].复合材料科学与工程,2024(9):98-104.

XU Lin, LIU Chuanjun, ZHAO Chongshu. Application and development trends of composite materials in civil aircraft[J]. Composites Science and Engineering, 2024(9): 98-104.

[12] 张念晖.民用飞机综合航电系统技术分析[J].数字通信世界,2022(12):62-64.

ZHANG Yuxuan. Technical analysis of civil aircraft integrated avionics system[J]. Digital Communication World, 2022(12): 62-64.

[13] 潘安娥,杨青.科技成果转化风险的模糊评价[J].武汉理工大学学报,2004,26(6):137-140,148.

PAN Ane, YANG Qing. Fuzzy appraisal of transformation risks of scientific achievements[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004, 26(6): 137-140, 148.

[14] 杨婷,王海旭,罗茜,等.高端科研仪器国产替代发展策略研究[J].中国医学装备,2022,19(11):201-206.

YANG Ting, WANG Haixu, LUO Qian, et al. Research on the development strategy of domestic substitution of high-end scientific research instruments[J]. China Medical Equipment, 2022, 19(11): 201-206.

[15] KIMMEL W M, BEAUCHAMO P M, FRERKING M A, et al. Technology readiness assessment best practices guide[R]. Cocoa Beach/Cape Canaveral, Florida: NASA, 2020.

[16] 科学技术研究项目评价通则:GB/T 22900—2022[S].北京:中国标准出版社,2022.

General rules of science and technology research project evaluation: GB/T 22900—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.

- [17] 韩晓玲. 民用飞机选型经济评估数学模型[J]. 中国民航大学学报, 1994(3): 10–19.
- HAN Xiaoling. The mathematical model of economic assessment in civil aircraft type-selection[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 1994(3): 10–19.
- [18] 李晓勇, 宋文滨. 民用飞机全寿命周期成本及经济性设计研究[J]. 中国民航大学学报, 2012, 30(2): 48–55.
- LI Xiaoyong, SONG Wenbin. Recent advances on life cycle costing of civil aircraft[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2012, 30(2): 48–55.
- [19] 孙雨辰. 基于系统工程理论的民用飞机成本问题研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2020(1): 61–69.
- SUN Yuchen. The study of civil aircraft cost based on the system engineering theory[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2020(1): 61–69.
- [20] 李晓勇, 叶叶沛, 邓磊. 基于LCC的民机项目盈亏平衡分析模型研究[J]. 中国民航大学学报, 2015, 33(2): 41–46, 64.
- LI Xiaoyong, YE Yepai, DENG Lei. Study on civil aircraft project breakeven analysis model based on LCC[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2015, 33(2): 41–46, 64.
- [21] MARKISH J, WILLCOX K. Multidisciplinary techniques for commercial aircraft system design[C]//9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. Reston, AIAA, 2002: 5612.
- [22] 叶珍. 基于AHP的模糊综合评价方法研究及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- YE Zhen. Study and application of fuzzy comprehensive evaluation based on AHP[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [23] 褚双磊, 魏志强, 任强, 等. 民用飞机性能选型评估研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2023(1): 22–30.
- CHU Shuanglei, WEI Zhiqiang, REN Qiang, et al. Comprehensive evaluation of civil aircraft performance selection[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2023(1): 22–30.
- [24] ZHANG J N, ROUMELIOTIS I, ZHANG X, et al. Technoeconomic–environmental evaluation of aircraft propulsion electrification: Surrogate-based multi-mission optimal design approach[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 175: 113168.
- [25] BALLARIN P, SALA G, AIROLDI A. Cost-effectiveness of structural health monitoring in aviation: A literature review[J]. Sensors, 2025, 25(19): 6146.
- [26] 中国民用航空局. “十四五”民航绿色发展专项规划[S]. 北京: 中国民用航空局, 2021.
- Civil Aviation Administration of China (CAAC). The 14th five-year plan for green development of civil aviation[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2021.
- [27] SCHOLZ D. Aircraft design[M]//Fundamentals of Robotic Mechanical Systems. Boston: Springer, 2015.
- [28] SAATY T. L. Decision making with the analytic hierarchy process[J]. International Journal of Services Sciences, 2008, 35(1): 83–98.
- [29] 袁尚南, 强茂山, 温祺, 等. 基于模糊层次分析法的建设项目组织效能评价模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, 55(6): 616–623.
- YUAN Shangnan, QIANG Maoshan, WEN Qi, et al. Organizational effectiveness evaluation model for construction projects based on fuzzy-analytic hierarchy processes[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2015, 55(6): 616–623.
- [30] 计蓉, 侯慧娟, 盛戈峰, 等. 基于组合赋权法和模糊综合评价的电力设备状态数据质量评估[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 274–281, 10021.
- JI Rong, HOU Huijuan, SHENG Gehao, et al. Data quality assessment for power equipment condition based on combination weighing method and fuzzy synthetic evaluation[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 274–281, 10021.
- [31] 林宇亮, 左伟俊, 邢浩, 等. 基于组合赋权–VIKOR法的山区施工便道方案优选模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(2): 445–456.
- LIN Yuliang, ZUO Weijun, XING Hao, et al. Optimization model on construction scheme of pioneer road in mountainous area based on combination weight and VIKOR method[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(2): 445–456.
- [32] AZADFALLAH M. AHP rank reversal: The impacts of scale, normalization and aggregation rules[J]. National Journal of System and Information Technology, 2014, 7(2): 113–126.
- [33] 徐泽水. 模糊互补判断矩阵排序的一种算法[J]. 系统工程学报, 2001, 16(4): 311–314.
- XU Zeshui. Algorithm for priority of fuzzy complementary judgement matrix[J]. Journal of Systems Engineering, 2001, 16(4): 311–314.
- [34] 陈华友, 赵佳宝. 模糊判断矩阵的相容性研究[J]. 运筹与管理, 2004, 13(1): 44–47.
- CHEN Huayou, ZHAO Jiabao. Research on compatibility of fuzzy judgement matrices[J]. Operations Research and Management Science, 2004, 13(1): 44–47.
- [35] 井思梦, 招启军, 杨柳青, 等. 直升机旋翼动态失速研究新进展[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(2): 205–225.
- JING Simeng, ZHAO Qijun, YANG Liuqing, et al. New progress in research on dynamic stall of helicopter rotors[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2025, 57(2): 205–225.
- [36] 程毅, 余智豪, 王司文, 等. 分布式推进旋翼飞行器回转头颤振特性研究[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(2): 243–251.
- CHENG Yi, YU Zhihao, WANG Siwen, et al. Research on whirl-flutter characteristics of distributed propulsive rotorcraft[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2025, 57(2): 243–251.
- [37] DUAN X S, YU S H, CHU J J, et al. A comprehensive assessment of environmental factors in aircraft cockpit based on fuzzy evaluation[J]. Work, 2024, 77(1): 171–184.
- [38] 李茜, 崔艳林. 2020年高超声速推进技术发展综述[J]. 航空动力, 2021(2): 20–23.
- LI Qian, CUI Yanlin. Development review of hypersonic propulsion technology in 2020[J]. Aerospace Power, 2021(2): 20–23.
- [39] 谌广昌, 段小明, 朱金荣, 等. 直升机特定结构先进陶瓷材料研究进展与应用展望[J]. 无机材料学报, 2025, 40(3): 225–244.
- CHEN Guangchang, DUAN Xiaoming, ZHU Jinrong, et al. Advanced ceramic materials in helicopter special structures: Research progress and application prospect[J]. Journal of Inorganic Materials, 2025, 40(3): 225–244.
- [40] 孟松鹤, 叶雨玫, 杨强, 等. 数字孪生及其在航空航天中的应用[J]. 航空学报, 2020, 41(9): 6–17.
- MENG Songhe, YE Yumei, YANG Qiang, et al. Digital twin and its aerospace applications[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(9): 6–17.
- [41] 陈钰, 宗群, 张秀云, 等. 直升机旋翼振动主动控制方法研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(8): 1–17.
- CHEN Yu, ZONG Qun, ZHANG Xiuyun, et al. Research progress of active vibration control methods for helicopter rotor[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(8): 1–17.

(责编 七七)