

引用格式: 张雨辰, 王宇, 马义博. 低空经济装备与服务标准化评价方法探讨[J]. 标准化学报, 2026(9): 56-61.
ZHANG Yuchen, WANG Yu, MA Yibo. Discussion on Standardization Evaluation Methods for Low-altitude Economic Equipment and Services[J]. Journal of Standardization, 2026(9): 56-61.

低空经济装备与服务标准化评价方法探讨

张雨辰 王宇* 马义博

(中国标准化研究院)

摘要:【目的】为解决低空经济装备与服务标准化评价中存在的指标碎片化、评估手段单一以及适用性有限等难题,着力构建科学且系统的评价体系。【方法】通过引入层次分析法确定各项指标的权重,融合模糊综合评价法实现定性指标的量化转化,最终构建包含技术合规、安全保障、服务效能、经济适配4个维度的复合型评价模型,同时借助无人机物流配送应用案例开展模拟测试。【结果】组合评价法较单一方法在识别不同标准化程度时展现出更优的灵敏度与稳定性。【结论】该方法可为低空经济领域标准化建设与质量管控提供具备可操作性的量化评估支撑。

关键词: 低空经济; 标准化评价; 层次分析法; 模糊综合评价; 无人机物流

DOI编码: 10.3969/j.issn.2097-857X.2026.09.005

Discussion on Standardization Evaluation Methods for Low-altitude Economic Equipment and Services

ZHANG Yuchen WANG Yu* MA Yibo

(China National Institute of Standardization)

Abstract: [Objective] To address the challenges of fragmented indicators, limited assessment methods, and restricted applicability in the standardization evaluation of low-altitude economic equipment and services, this study aims to construct a scientific and systematic evaluation system. [Methods] The weights of each indicator were determined by introducing the analytic hierarchy process (AHP), and the qualitative indicators were quantified by integrating the fuzzy comprehensive evaluation method. Finally, a composite evaluation model was constructed, encompassing four dimensions: technical compliance, safety assurance, service efficiency, and economic suitability. Simulation tests were conducted using a case study of UAV logistics delivery. [Results] The combined evaluation method demonstrated superior sensitivity and stability in identifying different levels of standardization compared to single methods. [Conclusion] This method can provide practical quantitative assessment support for standardization construction and quality control in the low-altitude economic field.

Keywords: low-altitude economy; standardization evaluation; analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation; unmanned aerial vehicle logistics

基金项目: 本文受中国标准化研究院基本科研业务费所管项目“低空无人机充换电基础设施关键技术研究”(项目编号: 652026YS-13829)资助。

作者简介: 张雨辰, 本科, 助理研究员, 研究方向为低空经济标准化。

王宇, 通信作者, 博士, 研究方向为低空经济标准化。

马义博, 本科, 研究实习生, 研究方向为低空经济标准化。

0 引言

随着全球新一轮科技革命和产业变革的深入推进,以低空经济为代表的新兴业态蓬勃兴起,正深刻重塑产业格局与发展范式,2023年9月,习近平总书记在黑龙江考察时指出,整合科技创新资源,引领发展战略性新兴产业和未来产业,加快形成新质生产力^[1]。低空经济作为战略性新兴产业的典型代表,其标准化建设急需科学评价方法的支撑。然而,随着产业的深入发展,装备技术标准不统一、服务流程缺少规范、质量评估标准模糊等问题愈发凸显,阻碍了行业的良性健康发展。标准化评价作为质量管控的基础性工具,其方法的科学性直接影响评价结果的客观性与权威性,而现有评价体系难以适配低空经济的技术复杂性与应用场景多样性,亟须开展针对性的方法论研究与验证工作。

针对上述问题,本文引入层次分析法与模糊综合评价法,构建了包含技术合规、安全保障、服务效能、经济适配4个维度的复合型评价模型,并结合无人机物流配送应用案例开展模拟测试,研究组合评价法在低空经济装备与服务标准化程度识别中的灵敏度与稳定性,以期为低空经济领域标准化建设与质量管控提供具备可操作性的量化评估支撑。

1 低空经济装备与服务标准化评价的对象界定与特征分析

1.1 低空经济装备的类型划分与技术特征

低空经济装备按照动力与功能分为多旋翼无人机、固定翼无人机、电动垂直起降飞行器以及传统通用航空器四大类。其中,多旋翼无人机凭借操作简单、起降方便的特点在物流运输与农业植保等领域得到广泛应用。

从核心技术指标来看,各类装备在最大起飞重量、有效载荷、续航能力及巡航速度等参数上存在明显差异:消费级多旋翼无人机的起飞重

量通常低于25 kg,续航时间为30~50 min;工业级物流无人机的有效载荷可达30~60 kg,航程覆盖50~120 km^[2]。

从动力系统来看,各类装备的动力系统主要包含锂电池、氢燃料电池与油电混合3种技术方案。不同方案在能量密度、充电效率与环境适应性方面各具优势。这种技术多样性为制定统一评价标准带来了差异化识别的挑战。

1.2 低空经济服务的业态分类与质量属性

低空经济服务依托各类飞行器运营催生了多种产业形态,主要涵盖货物运输、农业植保、电网巡检、地理测绘、紧急救援及观光游览六大板块。各类业务由于目标客户与价值定位不同而具备差异化特征:货物运输着重速度保障与商品完整性,其终端配送时效通常比陆地运输快40%以上;农业植保作业关注覆盖面与喷洒均匀性,单机日作业量可达200~400亩(1亩 $\approx$ 666.7 m²);电网巡检重视故障识别精度与影像清晰度,要求图像解析度达到厘米级标准。不同行业的质量属性差异显著,因此标准化评价需深入分析各业态核心需求,避免用同一衡量标准对多样化服务直接比较,防止评估结果偏离真实情况。

1.3 标准化评价面临的对象异质性与动态性挑战

低空经济装备与服务的标准化评价工作需要同时应对对象差异大以及技术发展快的挑战。就异质性而言,评估范围涉及从小型个人无人机到大型载人飞行器的各类产品,其载重从0.25 kg至数吨不等,用途涵盖娱乐消费、工业作业及公共服务等多个场景,难以用统一标准进行全面衡量。就动态性而言,该领域技术更新频率远超传统航空领域,智能避障技术、高能量密度电池及轻质复合材料等核心技术持续突破,产品性能指标每隔2~3年即实现显著提升^[3]。与此同时,空域使用规范、适航审批流程及运营许可标准等政策法规体系持续优化,这种制度环境变化使评价体系面临在维持稳定性与提升适应性之间取舍的挑战。

2 标准化评价方法的类型比较与适用性辨析

2.1 定性评价方法的优势边界与局限性

定性评价方法依靠专家经验判断与主观分析,对评价对象进行等级评定或排序。其主要形式包括专家评议法、德尔菲法及检核表法等。这类方法实施简单、对数据要求不高,特别适合指标难以量化或数据获取成本高昂的情况,能够充分整合领域专家的隐性知识与实际经验。

与此同时,定性方法存在若干固有局限:专家个人知识背景与主观判断会直接影响最终结果,不同评判者之间意见差异较大,评价结果的稳定性与公正性难以充分保证^[4]。此外,当评估对象庞杂或指标体系繁复时,专家的认知负荷会显著增加,导致判断一致性下降。这一根本缺陷使定性方法难以独立用于大规模、高标准的评价场景。

2.2 定量评价方法的技术要求与应用条件

定量评价方法借助数学模型与统计技术,将评价目标的特性转化为可量化的数值指标,常见手段包括层次分析法、熵权法、数据包络分析法及主成分分析法等。这类方法的核心优势在于评价流程公开透明且结果可验证,能够有效减少主观判断带来的干扰,便于不同评价单元之间进行对比分析。

然而,定量方法的实际运用需要满足若干关键前提:评价指标须具备清晰的测量标准与可信的数据基础;样本规模应达到统计分析的基本门槛,部分方法对数据分布特性存在特定假设条件。以层次分析法为例,其判断矩阵需通过一致性检验方可采用,一致性比率的计算见式(1):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (1)$$

式中: CR 为一致性比率, CI 为一致性指标, RI 为随机一致性指标。

当 $CR < 0.1$ 时,判断矩阵通过一致性检验,表明专家赋值具有可接受的逻辑一致性。

2.3 组合评价方法的互补机理与集成逻辑

考虑到定性分析与定量分析各有长处且具有互补潜力,组合评价方法通过融合多种单一方法,突破各自局限,强化评价效果^[5]。其协同机制体现在2个方面:定性分析能够为定量模型提供初始参数设定与指标选择依据,弥补纯数据方法在专业知识融入方面的欠缺;定量分析可以对定性结论进行系统性梳理与一致性检验,提升评价结果的可靠性与稳定性。

在集成逻辑上,组合评价通常按照“定性筛选—定量建模—综合研判”的步骤逐步开展,具体如图1所示。这种综合运用技术框架将专家经验与数据手段深度融合,在保证评价灵活性的基

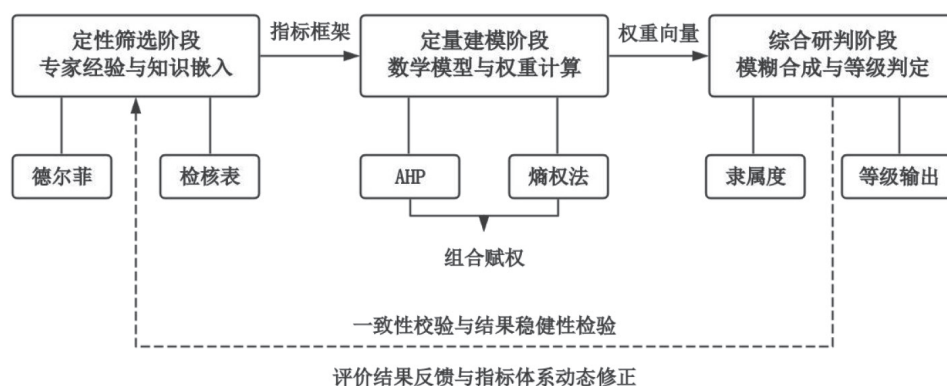


图1 组合评价方法的集成路径

础上增强结论的可靠性,为复杂问题的规范化评估提供兼顾主观判断与客观依据的有效途径。

3 基于层次分析与模糊综合的评价模型构建

3.1 评价指标体系的维度划分与层级设计

在构建低空经济装备与服务标准化评价指标体系时,应做到系统性、可测性与导向性三者并重,采用目标层、准则层、指标层三级架构。目标层旨在对标准化综合水平展开全面评估,准则层依据评价对象的核心特征划分为技术合规、安全保障、服务效能、经济适配4个维度。其中,技术合规性重点关注装备参数与技术标准的匹配程度,安全保障性包含飞行与信息安全等关键要素,服务效能性侧重作业质量与响应速度,经济适配性聚焦成本效益与资源利用效率。指标层针对各准则维度进一步分解,划分出若干个能够进行量化的指标,具体见表1。

在筛选指标时,将现行国家标准与行业规范相结合,使该指标体系既涵盖标准化建设的核心要素,又确保数据可获取性和实际应用的可操作性。

表1 评价指标体系框架

准则层	指标层
技术合规性	适航符合率、技术参数达标率、检测认证完备度
安全保障性	飞行事故率、应急响应能力、数据加密等级
服务效能性	任务完成率、作业精准度、用户满意度
经济适配性	单位作业成本、设备利用率、投资回收周期

3.2 指标权重的层次分析法确定流程

层次分析法依靠判断矩阵将专家的经验判断转化为具体的权重值,其操作步骤包括体系搭建、矩阵生成、权重测算和一致性校验4个部分^[6]。在构建判断矩阵时,需组织行业专家使用1~9评分标准(1表示两指标同等重要,9表示前者相较后者极端重要,2、4、6、8为相邻级别的中间值)对同级

别指标的优先程度开展成对比较,然后生成 n 阶正互反矩阵。权重测算运用特征根法,通过求解该矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$ 和对应特征向量,经过归一化处理得到各指标的权重向量 W 。权重向量的计算见式(2):

$$W_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}{\sum_{k=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{kj}}} \quad (2)$$

式中: W_i 为第 i 个指标的权重, a_{ij} 、 a_{kj} 为判断矩阵中第 i 行第 j 列的元素, k 为分母中的行遍历求和下标($k=1, 2, \dots, n$), n 为指标个数。

完成一致性检验后,逐级计算各层次的权重并将其相乘,得到指标层对目标层的综合权重,为后续开展总体评价工作提供权重依据。

3.3 模糊综合评价的隶属函数与运算规则

模糊综合评价法依靠隶属函数将指标数值转化为模糊隶属度,通过模糊矩阵运算完成多指标的综合判定。隶属函数根据指标特性确定:效益型指标采用升半梯形函数,成本型指标采用降半梯形函数,以此将指标值映射到 $[0,1]$ 的隶属度区间^[7]。评价等级划分为优秀、良好、合格、不合格,各指标在不同等级下的隶属度共同构成模糊评价矩阵 R 。综合评价的核心运算为权重向量 W 与评价矩阵 R 的模糊合成,其计算见式(3):

$$B=W \circ R \quad (3)$$

式中: B 为综合评价结果向量, W 为指标权重向量, R 为模糊评价矩阵, $\circ$ 为模糊合成算子,通常采用加权平均型算子。

按最大隶属度准则,选取结果向量 B 中数值最大的分量,其对应等级即为评价对象的标准化的程度,从而实现多维度指标向单一等级的转化^[8]。

4 模拟试验设计与评价方法效果验证

4.1 无人机物流配送场景的参数设定与样本生成

模拟试验选取无人机物流配送作为典型应

用场景。此场景既能评估设备技术指标,也能衡量运营服务质量,具备典型性与实践可行性。试验参数参照JT/T 1440—2022《无人机物流配送运行要求》及YZ/T 0172—2020《无人机快递投递服务规范》设定:无人机最大起飞质量为25 kg,有效载质量为5~8 kg,单次飞行距离为10~25 km,巡航速度保持在45~65 km/h,每架次作业时间为25~40 min。服务指标方面,要求订单配送时长不超过45 min,货物完好度不低于99.5%,每日飞行任务成功率维持在96%及以上^[9]。依据这一标准参数体系,运用蒙特卡洛模拟技术生成50组测试数据,每组数据涵盖12项评估指标的数值。这些数值在预设范围内随机生成,用于模拟不同标准化程度的设备配置与服务方案,为后续多种测算方法的并行比较提供统一的数据基准^[10]。

4.2 3种评价方法的并行测算与结果对比

为验证各类评价手段的实际效果与适用程度,研究综合运用单一定性方法、单一定量方法以及组合方法3种模式,对50组样本实施同步评估。定性评价由领域专家凭借专业知识对样本进行四级等级划分,定量评价依据指标体系核算各样本的加权总分并进行数值排序,组合方法在既定权重基础上借助模糊算子实现等级归属的判定。3种评价方式对部分典型样本的评估结果见表2。

由表2可知,定性方法在中间等级样本评价中,专家判断差异较大;定量方法虽能够提供精确的数值排序,但等级划分不够清晰;组合方法则兼具明确的等级判定与细致的数值排序,在信息融合方面展现出显著的综合效能。

4.3 评价方法的区分效度与稳健性检验

效度验证的主要目的在于评估评价手段能否准确区分不同标准化程度样本的差异。通过分析各类方法对优秀、良好、合格、不合格4类样本的判断吻合度进行量化对比。定性评价方法的平均吻合度为74%,定量方法在设定分数标准之后的吻合度为82%,组合方法的吻合度达91%,这表明组合方法在

表2 3种评价方法的测算结果对比(部分样本)

样本编号	定性方法判定	定量方法得分	组合方法等级
S03	优秀	0.872	优秀
S11	良好	0.756	良好
S19	良好/合格	0.684	良好
S28	合格	0.592	合格
S37	合格/不合格	0.513	合格
S45	不合格	0.406	不合格

辨别不同等级样本时拥有更强的判别能力。

为检验方法的可靠性,采用扰动分析法进行稳健性测试,即在原始数据基础上加入 $\pm 5\%$ 随机波动,再重复测算10次,观察评价结果的变化程度。试验数据显示,当数据发生扰动时,定性方法有21%的样本出现等级变化,定量方法的排序变动率达14%,而组合方法的等级变化率仅为7%。这表明组合方法能够有效抵御数据波动带来的干扰,评价结论的稳定性显著优于单一方法。

5 结语

构建低空经济装备与服务标准化评价方法,既要深入分析评价对象的差异化特点,又要平衡指标体系的科学性与评价模型的实用性。层次分析法通过构建判断矩阵实现主观偏好的结构化表达,模糊综合评价法则利用隶属函数将定性指标进行科学量化。2种方法的有机结合,在确保逻辑严谨的同时提升模糊信息的处理效能。模拟试验证实,该组合评价模型在评估不同方案标准化水平时表现出良好的区分度与计算稳定性,但面对更复杂的应用环境时,仍需持续优化指标动态调整机制,增强权重情境适应性及评价结果可追溯性,以提升方法体系对产业快速迭代的响应能力与适用广度。

参考文献

- [1] 郝力晓, 陈豪齐. 低空经济应用场景投入产出效率评价研究[J]. 科技和产业, 2026, 26(5): 100-111.
- [2] 杨扬, 宋岭, 宋建伟. 面向低空经济政策量化评价的模糊政策一致性(FPMC)指数模型研究[J]. 科技管理研究, 2026, 46(4): 32-39.
- [3] 傅惠, 崔煜, 赵佳虹, 等. 低空无人机物流配送研究与应用综述[J]. 工业工程, 2025, 28(1): 9-21.
- [4] 李楠, 辛春阳. 基于聚类-Floyd-遗传算法的“车辆+无人机”城市物流配送路径优化[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(21): 9186-9193.
- [5] 范厚明, 甘兰, 张跃光, 等. 有禁飞区的时间依赖型车辆与无人机协同配送路径优化[J]. 控制理论与应用, 2024, 41(2): 321-330.
- [6] 张洪海, 夷珈, 李姗, 等. 低空空域容量评估研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(6): 78-93.
- [7] 曲欣宇, 叶博嘉, 程予, 等. 物流无人机城市低空轴辐式网络构建方法研究[J]. 山东科学, 2023, 36(6): 86-95.
- [8] 刘光才, 马寅松. 城市物流无人机配送中心选址及任务分配研究[J]. 飞行力学, 2023, 41(3): 88-94.
- [9] 吴暖, 代焕杰, 李季涛, 等. 考虑时间容忍度的冷链物流配送路径多目标优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(2): 275-284.
- [10] 张洪海, 冯棣坤, 张晓玮, 等. 城市物流无人机起降点布局规划研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(3): 207-214.