DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.9.296 **中图分类号**：TM724.1 **文献标志码**：A

无人机 WPT 系统综合性能的定量评价

刘 垚，张 波(中国电源学会会士)
(华南理工大学电力学院，广州 510640)

摘要：针对无人机无线电能传输 WPT(wireless power transfer)系统缺乏系统性性能评估方法的问题，提出了一种基于层次分析法 AHP(analytic hierarchy process)与模糊综合评价的综合性能定量评价模型。该模型从充电能效、系统经济性与适配性、可靠性与环境适应性 3 个准则层出发，进一步将评价指标细分为传输效率、额定功率、单位功率成本、维护便利程度、环境适应性等 13 项具体指标，构建了层次化的评价体系。通过专家判断矩阵确定各指标权重，并结合模糊综合评价方法实现对系统的多维度量化分析。算例验证表明，该模型能有效评估不同技术路线的系统性能，为无人机 WPT 系统的设计优化与选型决策提供科学依据。

关键词：无人机；无线电能传输；综合评价；层次分析法；模糊综合评价

Quantitative Evaluation of the Comprehensive Performance of Unmanned Aerial Vehicle WPT Systems

LIU Yao, ZHANG Bo, *Fellow, CPSS*
(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: To address the lack of systematic performance evaluation methods for unmanned aerial vehicle wireless power transfer (WPT) systems, a comprehensive quantitative evaluation model based on the analytic hierarchy process (AHP) and fuzzy comprehensive evaluation is proposed. The model establishes a hierarchical evaluation framework from three criteria layers: charging energy efficiency, system economy and applicability, as well as reliability and environmental adaptability. These are further subdivided into 13 specific indicators, including transmission efficiency, rated power, unit power cost, maintenance convenience, and environmental adaptability. The weight of each indicator is determined through expert judgment matrices, and a multi-dimensional quantitative analysis of the system is achieved by integrating the fuzzy comprehensive evaluation method. A case study demonstrates that the model can effectively evaluate the performance of systems with different technical approaches, providing a scientific basis for the design optimization and selection decisions of unmanned aerial vehicle wireless power transfer systems.

Keywords: Unmanned aerial vehicle; wireless power transfer (WPT); comprehensive evaluation; analytic hierarchy process (AHP); fuzzy comprehensive evaluation

无人机作为现代高科技发展的代表性产物，已深度融入国民经济与军事应用的诸多方面，如航拍摄影[1]、农业植保[2]、电力巡检[3]、物流配送[4]及海洋设备[5]等，其价值日益凸显。然而，有限的续航能力始终是制约其执行长时间、大范围任务的核心瓶颈。传统的电池更换或有线充电方式效率低下，在复杂危险环境中可行性差、人力成本高。无人机无线电能传输 WPT(wireless power transfer)技术通过非接触能量传输，为实现无人机的自动化和常态化作业提供了关键支撑，已成为当前研究的热点[6-8]。

目前，学术界与工业界已涌现多种技术路线的无人机 WPT 系统，如磁耦合谐振式、电场耦合式等，并在提升传输效率与功率等单一指标方面取得

收稿日期：2025-11-17；**修回日期**：2026-01-07，2026-01-27；
录用日期：2026-02-09；**网络首发日期**：2026-04-07
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52130705)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52130705

了显著进展。例如，文献[9]基于非线性宇称-时间 PT(parity-time)对称理论构建了效率达 93.6%的系统；文献[10]提出的正交耦合结构实现了 100 W 的功率传输。然而，一个卓越的 WPT 系统不仅需要优异的电气性能，还需兼顾经济成本、平台适配性、环境鲁棒性及维护便利性等多维度属性。现有研究缺乏能够统筹考量这些因素的综合性能评价体系，导致难以对不同系统进行客观、全面的对比，从而为系统设计优化与工程选型带来困难。

为解决上述问题，本文借鉴系统工程领域的决策分析方法，构建了一个结合层次分析法[17]AHP (analytic hierarchy process)与模糊综合评价[18-19]的定量评价模型。首先，系统分析了影响系统性能的各项因素，建立了一个涵盖 3 个准则层、13 项指标的分层递阶评价指标体系；其次，通过 AHP 科学地确定各指标权重，揭示性能需求偏好；然后，通过模糊综合评判法构建二级模糊综合评价模型，定量化定性指标；最后通过 3 个典型实例验证了模型的有效性与实用性，旨在为研发人员优化设计，为应用方选择产品提供一套科学、可靠的理论工具与实践指南。

1　综合评价指标体系构建

构建评价指标体系需遵循科学性、系统性、可操作性和相对独立性原则。无人机 WPT 系统的综合性能并非由单一维度决定，而是多个相互关联、相互制约的因素共同作用的结果。首先，确定本文的目标层为无人机 WPT 系统综合性能的定量评价 A。接着，基于文献计量与典型技术方案分析进行初步筛选，梳理了国内外与无人机 WPT 技术及系统评价相关的文献[6-16]，通过对高频关键词如传输效率、偏移、容错等的归纳，以及对代表性技术的解析，初步提取覆盖技术性能、经济效益与适配性等多个维度的备选指标池。然后，对指标进行应用场景的差异化需求考量，以增强评价体系的普适性。最后，依据文献分析，凝练并确立了包含 3 个准则层及 13 项指标的最终体系，图 1 展示了本文所构建的指标体系。

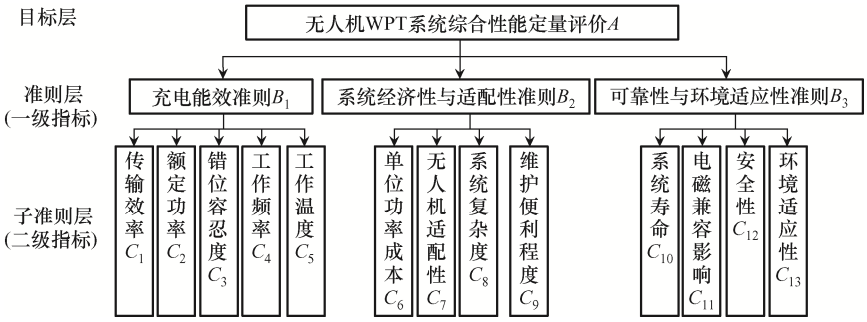


图 1　指标层次结构

Fig. 1 Hierarchical structure of indicators

1.1　充电能效准则 B_1

B_1 直接反映了 WPT 系统最核心的技术能力，是衡量其能量传输性能的根本。它包含 5 个关键指标：①传输效率 C_1，指系统从输入端口到无人机电池端的端到端能量传输效率，是衡量系统能量利用率和发热损耗的关键参数，高效率意味着更少的能量浪费与更佳的经济性；②额定功率 C_2，指系统能够稳定提供的充电功率水平，高功率意味着更短的充电时间，直接提升了无人机的工作效率与起降频次；③错位容忍度 C_3，指在无人机降落位置与充电发射端存在水平或垂直偏差时，系统仍能维持有效充电的能力；④工作频率 C_4，指 WPT 系统功率变换器中进行高频切换动作的频率，频率过高会导致开关损耗增加，线圈的集肤效应更显著，频率过低则会导致整套系统体积和质量更大；⑤工作温度 C_5，是开关管、整流桥、耦合装置达到额定功率时的温度水平，是衡量系统热设计与散热能力的关键指标。

1.2 系统经济性与适配性准则 B_2

B_2关注系统的生命周期成本及其与不同无人机平台的匹配能力，决定了技术可行性与市场推广潜力。它包含 4 个指标：①单位功率成本 C_6，通常以“元/W”来计算，综合了系统的硬件、材料和生产制造成本，是影响无人机 WPT 系统初期投资与商业化前景的重要经济指标；②无人机适配性 C_7，指充电系统对无人机质量、体积、气动外形以及电气接口等方面的影响程度，理想系统需兼顾轻量化设计，使其易于集成到现有无人机平台中；③系统复杂度 C_8，指系统安装与调试难度，低复杂度的系统可以更便捷地推广与应用；④维护便利程度 C_9，指系统日常维护所需的时间和资源，高维护便利性可以降低长期运营成本。

1.3 可靠性与环境适应性准则 B_3

B_3 衡量系统在各类实际工作场景下的稳定运行能力与耐久度。它包含 4 个指标：①系统寿命 C_{10}，指核心元器件、线圈寿命以及系统长期频繁使用下的性能稳定性；②电磁兼容影响 C_{11}，指系统工作时产生的电磁场是否会对无人机自身的飞行控制、通信系统造成干扰，电磁干扰越小越好；③安全性 C_{12}，指系统是否具备过压、过流、过温保护和异物检测等安全机制；④环境适应性 C_{13}，指系统在宽温范围、湿度、粉尘、雨水等恶劣环境条件下维持正常工作的能力，这是保证其在户外工业场景中可靠应用的必要条件。

通过以上分析，构建了一个包含 1 个目标层、3 个准则层和 13 个指标的综合评价层次结构模型。该模型全面覆盖了无人机 WPT 系统从核心技术性能到实际应用价值的各个方面，为后续运用 AHP 进行权重计算与定量评价奠定了坚实的结构基础。

2 基于 AHP 的指标权重计算与分析

2.1 指标权重打分

在构建了完整的评价指标体系之后，下一个关键步骤是确定各层次中各项指标的相对权重。权重的大小直接反映了该指标在整体综合评价中的重要程度。常见的确定权重的方法有 AHP、熵权法等[20-21]，本文选择 AHP 确定权重。AHP 通过判断矩阵构建、层次单排序及一致性检验，能够将专家的经验判断转化为精确的数学权重，从而科学地解决权重分配这一核心问题。首先，依据表 1 所列的“1~9 标度法”及其含义，对同一层次内的各指标进行两两比较。通过发放问卷问询意见，构建准则层相对于目标层，以及各子准则层相对于其对应准则层的判断矩阵，见表 2~表 5。

表 1 AHP 判断矩阵标度及其含义

Tab. 1 Scales and interpretations of AHP judgment matrix

标度	含义
1	表示 2 个因素相比，具有同等重要性
3	表示 2 个因素相比，前者比后者稍微重要
5	表示 2 个因素相比，前者比后者明显重要
7	表示 2 个因素相比，前者比后者强烈重要
9	表示 2 个因素相比，前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	上述相邻判断的中间值
倒数	若因素 i 与 j 的重要性之比为 a_{ij}，则因素 j 与 i 的重要性之比为 $a_{ji}=1/a_{ij}$

表 2 A 下判断矩阵

Tab. 2 Judgment matrix under A

A	B_1	B_2	B_3
B_1	1	3	4
B_2	1/3	1	3
B_3	1/4	1/3	1

表 3 B_1 下各指标判断矩阵

Tab. 3 Judgment matrix of indicators under B_1

B_1	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
C_1	1	3	4	6	5
C_2	1/3	1	3	4	2
C_3	1/4	1/3	1	2	1/2
C_4	1/6	1/4	1/2	1	1/3
C_5	1/5	1/2	2	3	1

表 4 B_2 下各指标判断矩阵

Tab. 4 Judgment matrix of indicators under B_2

B_2	C_6	C_7	C_8	C_9
C_6	1	3	4	5
C_7	1/3	1	2	3
C_8	1/4	1/2	1	2
C_9	1/5	1/3	1/2	1

表 5　B_3 下各指标判断矩阵

Tab. 5 Judgment matrix of indicators under B_3

B_3	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}
C_{10}	1	1	1/3	3
C_{11}	1	1	1/3	2
C_{12}	3	3	1	4
C_{13}	1/3	1/2	1/4	1

表 2~表 5 构建的矩阵可以表示为

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

式中：a_{11} 为矩阵第 1 行第 1 列的元素；a_{nn} 为矩阵第 n 行第 n 列的元素；n 为指标数量。

判断矩阵源于人的主观判断，可能存在逻辑不一致的风险。因此，必须进行一致性检验以确保判断的合理性与可信度。一致性检验的步骤如下。

(1)计算一致性指标 C_{CI}。计算式为

$$C_{\mathrm{CI}} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \tag{2}$$

式中，$\lambda_{\max}$ 为矩阵的最大特征值。

(2)根据表 6 查找对应的一致性指标 C_{RI}。

表 6　一致性指标 C_{RI}

Tab. 6　Consistency index C_{RI}

n	1	2	3	4	5	6	7
C_{RI}	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36

(3)计算一致性比例 C_{CR}。计算式为

$$C_{\mathrm{CR}} = \frac{C_{\mathrm{CI}}}{C_{\mathrm{RI}}} \tag{3}$$

如果 C_{CR}<0.100，则认为矩阵的一致性可以接受。一致性的计算结果见表 7。可知，对于表 2~表 5 中的所有评价矩阵，其 C_{CR} 均小于 0.100，因此，一致性计算检验通过。这表明，专家在构建判断矩阵时，其主观判断具有良好的一致性，权重分配合理可信，可以基于此权重体系进行后续的无人机 WPT 系统综合评价。

表 7　一致性计算结果

Tab. 7 Results of consistency check

	A-B_1~B_3	B_1-C_1~C_5	B_2-C_6~C_9	B_3-C_{10}~C_{13}
$\lambda_{\max}$	3.09	5.16	4.03	4.05
C_{CI}	0.05	0.04	0.01	0.01
C_{RI}	0.52	1.12	0.89	0.89
C_{CR}	0.070	0.030	0.016	0.017

2.2　指标权重计算

为了提高模型的稳健性与可靠性，本文分别采用算术平均法、几何平均法以及特征值法计算 3 次，然后对 3 次结果取平均，作为最终结果。这避免了单一方法产生的偏差，得出的结论更全面、有效。求解步骤如下。

(1)算术平均法求权重。

步骤为：①将式(1)的矩阵按照列归一化；②将归一化的各列相加；③将求和所得向量的各元素除以 n，即可得到权重向量。

算术平均法求解权重向量的计算式为

$$\boldsymbol{w}_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^{n} a_{kj}} \tag{4}$$

式中，a_{kj} 为式(1)矩阵中的元素。

(2)几何平均法求权重。

步骤为：①将式(1)矩阵的元素按照行相乘，得到新的列向量；②对新向量的各分量开 n 次方；③对该列向量进行归一化。

几何平均法求解权重向量的计算公式为

$$\boldsymbol{w}_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^{n} a_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{k=1}^{n}\left(\prod_{j=1}^{n} a_{kj}\right)} \qquad i = 1, 2, \cdots, n \tag{5}$$

(3)特征值法求权重。

步骤为：①求出式(1)矩阵的最大特征值及其对应的特征向量；②对求出的特征向量归一化。

(4)求和取平均。

对步骤(1)~(3)求得的权重求和，然后取平均，得到最终的权重向量为

$$\begin{cases} \boldsymbol{W}_A = \{0.605\,8, 0.272\,2, 0.122\,0\} \\ \boldsymbol{W}_{B_1} = \{0.495\,2, 0.263\,5, 0.126\,1, 0.070\,2, 0.045\,0\} \\ \boldsymbol{W}_{B_2} = \{0.558\,4, 0.263\,2, 0.121\,9, 0.056\,5\} \\ \boldsymbol{W}_{B_3} = \{0.467\,3, 0.277\,2, 0.160\,3, 0.095\,2\} \end{cases} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{W}_A$为目标层的权重向量；$\boldsymbol{W}_{B_1}\sim\boldsymbol{W}_{B_3}$为准则层的权重向量。因此，目标层和准则层的得分可以表示为

$$\begin{cases} W_A = 0.605\,8B_1 + 0.272\,2B_2 + 0.122\,0B_3 \\ W_{B_1} = 0.495\,2C_1 + 0.263\,5C_2 + 0.126\,1C_3 + \\ \quad 0.070\,2C_4 + 0.045\,0C_5 \\ W_{B_2} = 0.558\,4C_6 + 0.263\,2C_7 + 0.121\,9C_8 + \\ \quad 0.056\,5C_9 \\ W_{B_3} = 0.467\,3C_{10} + 0.277\,2C_{11} + 0.160\,3C_{12} + \\ \quad 0.095\,2C_{13} \end{cases} \tag{7}$$

通过权重向量可以看出，充电能效(0.605 8)>系统经济性与适配性(0.272 2)>可靠性与环境适应性(0.122 0)。传输效率、额定功率、单位功率成本前 3 大指标的合计权重达 65.9%，这反映了在本文构建的评价模型中，技术性与经济性是较为核心的考量因素。这一结果与行业技术发展趋势一致：如文献[27]明确指出，无人机 WPT 系统面临互感扰动、轻量化设计等技术难题，其核心在于提升能量传输效率；文献[28]进一步强调，在技术可行的基础上，成本控制与产业化潜力是推动市场应用的关键。以上结果反映了本文对无人机 WPT 系统性能特性的需求偏好，对其他特殊的应用场景，还应根据具体的需求偏好做出决断。

3 基于模糊理论的综合性能评价

虽然 AHP 能够科学地确定各项指标的权重，解决了“各指标相对重要性如何”的问题，但它本身并不能对指标的实际表现进行量化评价。为了实现对无人机 WPT 系统综合性能的全面量化评估，需将权重信息与指标实际表现的评价相结合。

因此，本文在 AHP 确定权重的基础上，引入模糊综合评价法。模糊综合评价通过“隶属度”概念，描述指标在多大程度上属于某个评价等级，如“优秀”“良好”等，从而更贴合对复杂属性的判断。例如，系统的安全性指标可被评价为 70%属于“良好”、30%属于“中等”。最终，将 AHP 所得的权重向量与模糊综合评价所得的评价矩阵进行合成运算，得到系统的综合评分，完成从权重分配到表现评价的全部分析。

以无人机 WPT 系统综合性能作为评价对象，运用模糊综合评判方法，建立二级评判模型，进行性能评价，具体步骤如下。

(1)确定第一级因素集和第二级因素集。

根据本文建立的指标体系，确定模糊综合评判的第一级因素集和第二级因素集。本文第一级因素集 A 包含 B_1、B_2、B_3，具体可表示为

$$A=\{B_1, B_2, B_3\} \tag{8}$$

第二级因素集 B_1 包含 C_1、C_2、C_3、C_4、C_5；第二级因素集 B_2 包含 C_6、C_7、C_8、C_9；第二级因素集 B_3 包含 C_{10}、C_{11}、C_{12}、C_{13}。构建的第二级因素集为

$$\begin{cases} B_1=\{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5\} \\ B_2=\{C_6, C_7, C_8, C_9\} \\ B_3=\{C_{10}, C_{11}, C_{12}, C_{13}\} \end{cases} \tag{9}$$

(2)确定评语集。

设定 5 级评语集 V={v_1, v_2, v_3, v_4, v_5}={优秀，良好，中等，合格，不合格}，对应分值向量为[95 85 75 65 55]

为确保评价体系中定性指标(如适配性、复杂度、寿命、安全性、环境适应性)的量化具有一定的客观性，本文在制定 5 级评语集量化时，参考了相关标准和依据，并在此基础上进一步制定了表 8，专家在打分时可参照表中所列内容进行判断。具体而言：C_3 参考了待评价文献[9-11]的实际错位容忍性能，按偏移距离与效率维持能力分级；C_7 指标按对无人机平台的改装程度划分；C_8 按照整套系统实现的难易程度划分；C_9 综合模块化设计与现场操作难度进行梯度划分；C_{10} 指标参考了文献[23]对电子元件寿命的分析，按预测工作寿命与循环次数设定；C_{12} 参考软硬件保护机制的完备性进行评价；C_{13} 参考了 GB/T 2423.1—2008、GB/T 2423.2—2008[24-25]与 GB/T 4208—2017[26]的防护等级。

表 8　定性指标量化依据

Tab. 8 Quantification basis for qualitative indicators

指标	优秀(95 分)	良好(85 分)	中等(75 分)	合格(65 分)	不合格(55 分)
C_3	偏移≥100 mm，效率≥90%	偏移 50~100 mm，效率 80%~90%	偏移 15~50 mm，效率 70%~80%	仅允许≤15 mm 微小偏移，效率<70%	偏移>5 mm 即充电中断
C_7	集成度高，无需外形改动，接口标准化	需少量改装，对气动影响小	需结构调整，对气动和载荷影响较明显	需大改，明显影响气动或载荷	无法集成，严重影响飞行
C_8	初级侧控制，简单反馈，无复杂检测电路	需无线通信反馈，含基础检测电路	需多路反馈与复杂检测，调试较复杂	控制策略复杂，调试困难	控制策略极其复杂，难以推广应用
C_9	模块化设计，器件易更换，元件通用性高	模块化程度较高，更换较方便	部分模块化，部分元件需定制	元件不易更换，需定制	无法维护
C_{10}	寿命≥10 万小时，循环≥10 万次，性能稳定	寿命≥5 万小时，循环 5~10 万次	寿命≥2 万小时，循环 1~5 万次	器件≥1 万小时，循环<1 万次	无明确寿命指标，性能衰减快
C_{12}	具备硬件与软件保护，逻辑完备	具备主要硬件保护或软件保护功能	以软件保护为主，硬件冗余不足	异常工况行为未经充分验证	无明确保护设计，存在安全隐患
C_{13}	防尘、防水、防盐雾，适用于极端户外环境	防尘、防水，适用于一般户外环境	防尘、防溅，适用于轻度户外或半户外环境	仅限室内或温和环境使用	仅适用于实验室

(3)确定隶属度和评价矩阵。

确定隶属度的常见方法有指派法、模糊统计试验法等。指派法的优点是无需大量数据，直接根据理论或经验定义，速度快、成本低；缺点是高度依赖个人或作者的主观判断，不同作者可能给出不同的函数形式和参数，从而导致结果不一致。模糊统计试验法基于多个数据，减少了单一样本的偏差。本文采用模糊统计试验法确定隶属度，通过发放问卷，收集多位专家对某个模糊概念的归属判断，并用频率分布来近似隶属度。以 C_1 为例，若 8 份问卷评为优秀，2 份评为良好，则 C_1 的隶属度向量为[0.8　0.2　0　0　0]，将该隶属度向量作为评价矩阵的第 1 行，然后依次确定 C_2~C_5 的隶属度向量。

(4)对第二级因素集进行综合评判。

依照步骤(3)确定隶属度和构建评价矩阵的方法，依次构建所有第二级评价矩阵 $\boldsymbol{R}_{B_N}$ 为

$$\boldsymbol{R}_{B_N}=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \tag{10}$$

式中：N=1, 2, 3；r_{11} 为第 1 个指标对第 1 个评语等级的隶属度；r_{nm} 为第 n 个指标对第 m 个评语等级的隶属度。本文第 2 节通过 AHP 得到了第二级因素集的权重为 $\boldsymbol{W}_{B_1}$、$\boldsymbol{W}_{B_2}$、$\boldsymbol{W}_{B_3}$，那么第二级因素集的模糊合成值 $\boldsymbol{S}_{B_N}$ 为

$$\boldsymbol{S}_{B_N}=\boldsymbol{W}_{B_N}\cdot\boldsymbol{R}_{B_N} \tag{11}$$

(5)对第一级因素集进行综合评判。

由步骤(3)中得到的 $\boldsymbol{S}_{B_N}$ 组成第一级因素集评判矩阵 $\boldsymbol{R}_A$，具体可表示为

$$\boldsymbol{R}_A=\begin{bmatrix} S_{B_1} \\ S_{B_2} \\ \vdots \\ S_{B_i} \end{bmatrix} \tag{12}$$

本文第 2 节通过 AHP 得到了第一级因素集的权重为 $\boldsymbol{W}_A$，那么第一级因素集的模糊合成值 $\boldsymbol{S}_A$ 为

$$\boldsymbol{S}_A=\boldsymbol{W}_A\cdot\boldsymbol{R}_A \tag{13}$$

(6)计算综合得分。

由评语集分值向量与第一级因素集的模糊合成值相乘得到最终得分。

4 实例验证与结果分析

4.1 实例验证

为验证本文构建的 AHP-模糊综合评价模型的有效性与实用性，本节选取了文献[9-11]中描述的无人机 WPT 系统作为评估对象，进行实例计算与对比分析。这 3 套系统在系统特色、额定功率、传输效率上各具特点，见表 9，能够较好地代表当前不同的技术发展方向。

表 9 待评价系统关键参数对比

Tab. 9 Comparison of key parameters of systems to be evaluated

文献	系统特色	额定功率/W	传输效率/%
文献[9]	非线性 PT 对称	10	93.6
文献[10]	正交耦合型	100	87.1
文献[11]	线圈替代防撞架	13	60.0

首先，发放 10 份问卷，并在问卷中提供详细的指标说明表，包括各项指标的定义、评价标准及典型取值范围。然后，参与问卷调查者根据各系统在每个指标上的实际表现，对照 5 级评语集{优秀，良好，中等，合格，不合格}进行独立打分。最后，收集所有的打分表，统计每个指标上各评语等级的得票数并计算隶属度。

对于文献[9]的 C_1 指标，有 8 份问卷评为优秀、2 份为良好，则 C_1 的隶属度向量为[0.8 0.2 0 0 0]；对于 C_2 指标，有 1 份问卷评为优秀、3 份为良好、4 份为中等、2 份为合格，因此其隶属度向量为[0.1 0.3 0.4 0.2 0]；对于 C_3 指标，文献[9]在 80 mm 的偏移距离内效率保持 93.6%，因此专家评分倾向于“良好”至“优秀”，有 3 份问卷评为优秀、7 份为良好，因此其隶属度向量为[0.3 0.7 0 0 0]。按照该方法依次完成 C_4、C_5 指标的隶属度构建。表 10 展示了文献[9]B_1 的问卷结果与隶属度构建过程。

表 10 B_1 评价矩阵数据计算过程

Tab. 10 Calculation process of B_1 evaluation matrix data

指标	优秀	良好	中等	合格	不合格	隶属度向量
C_1	8	2	0	0	0	[0.8 0.2 0 0 0]
C_2	1	3	4	2	0	[0.1 0.3 0.4 0.2 0]
C_3	3	7	0	0	0	[0.3 0.7 0 0 0 0]
C_4	3	4	2	1	0	[0.3 0.4 0.2 0.1 0]
C_5	1	2	5	2	0	[0.1 0.2 0.5 0.2 0]

综上，构建的 B_1 评价矩阵 $\boldsymbol{R}_{B_1}$ 为

$$\boldsymbol{R}_{B_1}=\begin{bmatrix}0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0\\ 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0\\ 0.3 & 0.7 & 0 & 0 & 0\\ 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0\\ 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0\end{bmatrix} \tag{14}$$

对于文献[9]的 C_7 指标，由于其采用传统的圆盘对圆盘结构，对无人机影响较大，问卷结果介于“良好”至“合格”的数量最多，其隶属度为[0.1 0.2 0.4 0.3 0]；对于 C_8 指标，问卷结果多在“中等”至“合格”之间，其隶属度为[0 0.1 0.3 0.4 0.2]，这是由于其采用非线性 PT 对称控制策略，原理较为复杂；对于 C_9 指标，有 2 份问卷评为优秀、4 份为良好、3 份为中等、1 份为合格，其隶属度向量为[0.2 0.4 0.3 0.1 0]。按照该办法，完成 C_6 指标的隶属度构建。基于此，得到 B_2 的评价矩阵 $\boldsymbol{R}_{B_2}$ 为

$$\boldsymbol{R}_{B_2}=\begin{bmatrix}0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0\\ 0.1 & 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0\\ 0 & 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.2\\ 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.1 & 0\end{bmatrix} \tag{15}$$

接下来，依次完成 C_{10}~C_{13} 指标的隶属度构建。基于此，得到 B_3 准则层的评价矩阵 $\boldsymbol{R}_{B_3}$ 为

$$\boldsymbol{R}_{B_3}=\begin{bmatrix}0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0\\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0\\ 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0\\ 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0\end{bmatrix} \tag{16}$$

由评价矩阵和权重向量得到第二级因素集的模糊合成值为

$$\begin{cases}\boldsymbol{S}_{B_1}=[0.486\,9\ \ 0.285\,5\ \ 0.165\,6\ \ 0.087\,8\ \ 0]\\ \boldsymbol{S}_{B_2}=[0.156\,6\ \ 0.225\,3\ \ 0.335\,0\ \ 0.255\,1\ \ 0.029\,9]\\ \boldsymbol{S}_{B_3}=[0.270\,0\ \ 0.364\,0\ \ 0.242\,0\ \ 0.124\,0\ \ 0]\end{cases} \tag{17}$$

然后，对第一级因素集进行综合评判。由式(17)构建的第一级因素集综合评价矩阵为

$$\boldsymbol{R}_A=\begin{bmatrix}\boldsymbol{S}_{B_1}\\ \boldsymbol{S}_{B_2}\\ \boldsymbol{S}_{B_3}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.486\,9 & 0.285\,5 & 0.165\,6 & 0.087\,8 & 0\\ 0.156\,6 & 0.225\,3 & 0.335\,0 & 0.255\,1 & 0.029\,9\\ 0.270\,0 & 0.364\,0 & 0.242\,0 & 0.124\,0 & 0\end{bmatrix} \tag{18}$$

按照式(13)，得到第一级因素集的模糊合成值为

$$\boldsymbol{S}_A=[0.378\,9\ \ 0.282\,0\ \ 0.215\,7\ \ 0.134\,6\ \ 0.008\,1] \tag{19}$$

因此，文献[9]综合得分为 $\boldsymbol{S}_A\cdot\boldsymbol{V}=85.35$，其中，$\boldsymbol{V}$ 是分值向量，$\boldsymbol{V}$=[95　85　75　65　55]。

同理可构建文献[10]的评价矩阵，计算得到的模糊合成值和综合得分分别为

$$\begin{cases}\boldsymbol{S}'_A=[0.262\,7\ \ 0.424\,5\ \ 0.226\,1\ \ 0.085\,8\ \ 0]\\ \boldsymbol{S}'_A\cdot\boldsymbol{V}=86.79\end{cases} \tag{20}$$

文献[11]的模糊合成值和综合得分分别为

$$\begin{cases}\boldsymbol{S}''_A=[0.078\,1\ \ 0.324\,0\ \ 0.506\,0\ \ 0.146\,0\ \ 0]\\ \boldsymbol{S}''_A\cdot\boldsymbol{V}=77.98\end{cases} \tag{21}$$

根据综合评分，3 种系统的性能优劣排序为：文献[10]>文献[9]>文献[11]。具体而言，文献[10]提出的正交耦合型系统，得益于其在充电能效准则层下的额定功率较高和效率指标表现优异，同时在系统经济与适配性等经济性指标上取得了较好的平衡，所以取得了最高分。文献[9]提出的非线性 PT 对称系统，虽然在传输效率上位列第一，具有绝对优势，但其额定功率较低且控制较为复杂，且适配性方面存在短板，导致其综合评分略低于文献[10]。文献[11]提出的接收线圈替代防撞架的系统，因核心传输效率指标偏低，只有 13 W，且效率为 60%，严重制约了其充电能效准则层的得分，进而显著影响了综合性能，最终得分为 77.98。

文献[22]同样构建了基于 AHP 与模糊综合评价的综合性能定量评价模型。表 11 对比了本文与文献[22]在研究方法上的区别，具体如下。

表 11　对比结果

Tab. 11 Results of comparison

	研究对象	指标体系	权重确定方法	隶属度确定方法
文献[22]	电磁耦合机构	能效、携能、空间特性指标	单一特征值法	指派法
本文	无人机 WPT 系统	系统能效、经济性与适配性、可靠性	特征值法、几何平均法、算术平均法	模糊统计试验法

(1)研究对象与指标体系不同：文献[22]针对感应式电能传输系统的电磁机构性能，属于局部部件评价；本文则面向无人机 WPT 系统整体，涵盖能效、经济适配性与环境适应性等多维度，适用于移动、多场景平台。

(2)AHP 权重计算方式不同：文献[22]仅采用特征值法确定权重；本文则综合特征值法、算术平均法及几何平均法分别计算权重，再取平均值作为最终权重，减少了单一方法偏差，提升了可靠性。

(3)模糊综合评价中隶属度确定方法不同：文献[22]采用指派法，依赖主观经验，效率高但一致性较差；本文使用模糊统计试验法，通过问卷收集数据，以频率分布确定隶属度，更依赖实际数据，客观性更强，但实施成本较高。

本文所采用的基于专家问卷的模糊统计试验法，其权威性最终取决于专家群体的代表性与专业性。在后续研究中，可引入实际用户体验等多源评价信息，并结合熵权法等客观赋权方法与主观权重进行组合，进一步提升评价体系的科学性与可信度。总体而言，本文构建的无人机 WPT 系统综合性能定量评价模型能够有效量化并区分不同技术路线、不同性能侧重的无人机 WPT 系统的综合性能，具有良好的适用性与区分度，结果可为系统设

计者提供明确指引。对于追求综合性能最优的系统，应在保证较高传输效率的同时，着力提升该功率并有效控制成本；而单纯追求某一单项指标，如极限效率或极简结构，不足以获得优异的综合表现。模型指出的具体劣势指标即为后续改进的关键方向。

4.2 灵敏性分析

为检验本文构建评价模型的鲁棒性，并探讨核心指标权重波动对最终评价结果的影响，本节进行灵敏度分析。通过观察关键指标权重变化时，文献[9-11] 3 个待评价系统的综合得分及排序是否发生显著变化，可以验证模型的稳定性，并为不同偏好场景下的决策提供参考。这里通过增加或减少 $\boldsymbol{W}_{B_1}$、$\boldsymbol{W}_{B_2}$、$\boldsymbol{W}_{B_3}$ 其中 1 个指标的权重来观察最终得分的影响。在增加或减少其中 1 个权重时，其他 2 个权重也要按相应比例减少或增加，以确保所有权重之和始终为 1。表 12 展示了本文所提评价模型的灵敏性分析结果。

在 3 个一级指标充电能效、经济性与适配性、可靠性与环境适应性的权重波动时，评价系统的性能排序保持稳定。这证明了本文构建的 AHP-模糊综合评价模型及各指标层具有较强的鲁棒性。

表 12 一级指标灵敏性分析

Tab. 12 Sensitivity analysis of first-level indicators

权重	文献[9]得分	文献[10]得分	文献[11]得分	得分排序
基准权重	85.35	86.79	77.98	[10]>[9]>[11]
$\boldsymbol{W}_{B_1}$ +30%	86.09	87.48	75.89	[10]>[9]>[11]
$\boldsymbol{W}_{B_1}$ −30%	84.35	85.84	80.18	[10]>[9]>[11]
$\boldsymbol{W}_{B_2}$ +30%	85.02	86.72	78.74	[10]>[9]>[11]
$\boldsymbol{W}_{B_2}$ −30%	85.63	86.85	78.23	[10]>[9]>[11]
$\boldsymbol{W}_{B_3}$ +30%	85.27	86.77	74.88	[10]>[9]>[11]
$\boldsymbol{W}_{B_3}$ −30%	85.40	86.80	77.78	[10]>[9]>[11]

5 结语

本文构建了一套基于 AHP 与模糊综合评价的无人机 WPT 系统综合性能定量评价模型。该模型通过涵盖充电能效等 13 项指标，建立了全面的评价体系。研究确定了以充电能效为核心，以传输效率等技术经济指标为关键要素的权重分配，并通过实例验证了模型在系统性能量化与对比上的有效性。实例验证表明，该模型不仅能清晰区分不同技术路线的性能差异，还反映出综合性能的提升需要多项指标的协同优化。对于不同环境下的需求，可以进一步完善评价体系、修正权重，进而为无人机 WPT 系统的设计优化与工程选型提供有效的决策支持工具。

参考文献：

[1] 尹秋燕，丁婧，聂志刚. YOLO-AirPose:无人机航拍视角下的人体姿态估计算法[J/OL]. 计算机应用，1-10. (2025-09-30)[2025-11-10]. https://link.cnki.net/urlid/51.1307.tp.20250929.1700.014.
Yin Qiuyan, Ding Jing, Nie Zhigang. YOLO-AirPose-A human pose estimation algorithm from UAV aerial perspectives [J/OL]. Journal of Computer Applications, 1-10. (2025-09-30)[2025-11-10]. https://link.cnki.net/urlid/51.1307.tp.20250929.1700.014. (in Chinese)

[2] 陆云亭，顾晟骅，宓宝，等. 植保无人机在水稻精准栽培及高效病虫害防治中的创新应用[J]. 农业开发与装备, 2025(10): 81-83.
Lu Yunting, Gu Shenghua, Mi Bao, et al. Innovative application of plant protection drone in rice precision cultivation and efficient pest control [J]. Agricultural Development & Equipments, 2025(10): 81-83. (in Chinese)

[3] 刘家睿. 基于深度学习的无人机电力巡检目标识别算法研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2025.
Liu Jiarui. Research on target recognition algorithm of UAV power inspection based on deep learning [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2025. (in Chinese)

[4] 刘佳雯，王锣莹，沈通，等. 国内外低空经济发展及其在铁路领域的应用场景研究[J]. 铁道运输与经济, 2025, 47(10): 30-43.
Liu Jiawen, Wang Liuying, Shen Tong, et al. Low-altitude economy development in China and abroad and its application scenarios in railways [J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(10): 30-43. (in Chinese)

[5] 张克涵, 李鑫阳, 代凡, 等. 海洋环境无线电能系统的参数设计及优化方法[J]. 电源学报, 2025, 23(2): 188-195.
Zhang Kehan, Li Xinyang, Dai Fan, et al. Design and optimization method for parameters of wireless power transfer system in marine environment [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(2): 188-195. (in Chinese)

[6] 杨睿, 赵梓杰, 兰天翔, 等. 一种无人机自动换电系统的设计[J]. 机械工程与自动化, 2022, 51(5): 189-191, 194.
Yang Rui, Zhao Zijie, Lan Tianxiang, et al. Design of automatic battery-replacement system for UAV [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2022, 51(5): 189-191, 194. (in Chinese)

[7] Aldhaher S, Mitcheson P D, Arteaga J M, et al. Lightweight wireless power transfer for mid-air charging of drones [C]// 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). Paris, France, 2017: 336-340.

[8] Park C, Park J, Shin Y, et al. Separated circular capacitive coupler for reducing cross-coupling capacitance in drone wireless power transfer system [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(9): 3978-3985.

[9] Zhou Jiali, Zhang Bo, Xiao Wenxun, et al. Nonlinear parity-time-symmetric model for constant efficiency wireless power transfer: Application to a drone-in-flight wireless charging platform [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(5): 4097-4107.

[10] Wu Shuai, Cai Chunwei, Jiang Longyun, et al. Unmanned aerial vehicle wireless charging system with orthogonal magnetic structure and position correction aid device [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 7564-7575.

[11] Arteaga J M, Aldhaher S, Kkelis G, et al. Dynamic capabilities of multi-MHz inductive power transfer systems demonstrated with batteryless drones [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5093-5104.

[12] Cao Pengcheng, Lu Yong, Zhang Haigang, et al. Embedded lightweight squirrel-cage receiver coil for drone misalignment-tolerant wireless charging [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(3): 2884-2888.

[13] Gu Yu, Wang Jiang, Liang Zhenyan, et al. Flexible constant-power range extension of self-oscillating system for wireless in-flight charging of drones [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(11): 15342-15355.

[14] Chen Kaibo, Zhang Zhen. Rotating-coordinate-based mutual inductance estimation for drone in-flight wireless charging systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(9): 11685-11693.

[15] Lü Xingchu, Dai Xin, Yu Fengye, et al. A high misalignment tolerance SCC-WPT system with relay single capacitive coupler for UAV wireless charging applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(8): 10372-10377.

[16] Jain S, Bharadwaj A, Sharma A. A mortarboard-shaped receiver antenna for drone wireless charging to achieve an outspread misalignment tolerance towards imperfect landing [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025, 74(1): 61-73.

[17] 张政, 张波. MCR-WPT 系统高频逆变器综合性能的定量评价[J]. 电测与仪表, 2020, 57(20): 134-140.
Zhang Zheng, Zhang Bo. Quantitative evaluation of comprehensive performance of MCR-WPT system high frequency inverter [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(20): 134-140. (in Chinese)

[18] 陈海华, 孙卫锋, 邹晓昕, 等. 基于模糊层次法和熵权法的电源点到役评估法[J]. 电源学报, 2025, 23(2): 290-297.
Chen Haihua, Sun Weifeng, Zou Xiaoxin, et al. Evaluation method for power source reaching service term based on fuzzy analytical hierarchy process and entropy weight method [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(2): 290-297. (in Chinese)

[19] 杨东, 刘治钢, 穆浩. 应用模糊理论的卫星电源系统状态量化评估方法[J]. 电源学报, 2024, 22(1): 212-221.
Yang Dong, Liu Zhigang, Mu Hao. Condition quantitative assessment method for satellite electrical power system with fuzzy theory [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(1): 212-221. (in Chinese)

[20] Wang Dan, Li Zairan, Dey N, et al. Case-based reasoning for product style construction and fuzzy analytic hierarchy process evaluation modeling using consumers lingui-

stic variables [J]. IEEE Access, 2017, 5: 4900-4912.

[21] 邓昂, 杨捷. 基于 AHP−熵权法−博弈论法的低压居民用电故障危险度综合评价[J]. 科技与创新, 2025(19): 21-24.
Deng Ang, Yang Jie. Comprehensive evaluation of fault risk of low-voltage residential electricity based on AHP-entropy weight method-game theory method [J]. Science and Technology & Innovation, 2025(19): 21-24. (in Chinese)

[22] 向利娟, 孙跃, 胡超, 等. 基于 AHP 和 FCE 的 IPTS 电磁机构性能评价[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 848-856.
Xiang Lijuan, Sun Yue, Hu Chao, et al. Performance evaluation for magnetic couplers in IPTS using AHP and FCE [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 848-856. (in Chinese)

[23] 黄琳森, 罗卫东, 陈永树, 等. 随机振动环境下车用电子元件寿命分析[J]. 机械制造, 2018, 56(9): 30-35.
Huang Linsen, Luo Weidong, Chen Yongshu, et al. Life analysis of automotive electronic components in random vibration environment [J]. Machinery, 2018, 56(9): 30-35. (in Chinese)

[24] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 2423.1—2008 电工电子产品环境试验 第 2 部分:试验方法 试验 A: 低温[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 2423.1—2008 Environmental testing - Part 2: Test methods - Tests A: Cold [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)

[25] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 2423.2—2008 电工电子产品环境试验 第 2 部分: 试验方法 试验 B: 高温[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 2423.2—2008 Environmental testing for electric and electronic products: Part 2: Test methods—Tests B: Dry heat [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)

[26] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 4208—2017 外壳防护等级(IP 代码)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Degrees of protection provided by enclosure(IP code): GB/T 4208—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)

[27] Chen Kaibo, Zhang Zhen. In-flight wireless charging: A promising application-oriented charging technique for drones [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2024, 18(1): 6-16.

[28] 2025-2030 中国自主无人机无线充电和基础设施行业市场发展趋势与前景展望战略研究报告[R/OL]. 2025 [2025-11-12]. https://max.book118.com/html/2025/0611/6002225120011142.shtm.
2025-2030 strategic research report on market development trends and prospects of China's indigenous UAV wireless charging and infrastructure industry [R/OL]. 2025[2025-11-12]. https://max.book118.com/html/2025/0611/6002225120011142.shtm. (in Chinese)



刘垚

作者简介:

刘垚(2000—), 男, 硕士研究生。研究方向: 无线电能传输技术。E-mail: 202320113893@scut.edu.cn。

张波(1962—), 男, 中国电源学会会士, 通信作者, 博士, 教授。研究方向: 电力电子与电力传动。E-mail: epbzhang@scut.edu.cn。

(责任编辑: 耿越)