

Comprehensive Performance Evaluation of Electric Vehicle Charging Station Based on Improved Fuzzy Analytic Hierarchy Process

Jianlong Yi, Furen Zhang

School of Electrical and Mechanical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400047, China

Abstract: Based on the improved fuzzy analytic hierarchy process (fuzzy - AHP), the comprehensive performance of a rapid charging station in a city was evaluated. Using the improved fuzzy analytic hierarchy process (ahp) got the weight of each index and criterion layer. Cooperated with the weights and expert's score of every index of the charging station, finally the overall score of the charging station were obtained, Compared with traditional AHP, the results showed that the improved fuzzy analytic hierarchy process is scientific and feasible, which could be used as the basis for the fuzzy comprehensive performance of charging stations. However, the method was still subject to subjective factors and need to be further improved.

Keywords: The electric car; Charging station; Comprehensive performance; Analytic hierarchy process; Fuzzy comprehensive evaluation

基于改进模糊层次分析法的电动汽车充电站综合性能评价

易建龙, 张甫仁

重庆交通大学机电与车辆工程学院, 重庆, 400074

摘要: 基于改进的模糊层次分析法 (fuzzy-AHP), 对某市快速充电站的综合性能进行了主观评价。通过改进的模糊层次分析法求得各指标层和准则层的各项权重, 结合专家对该充电站各指标层指标的评分, 最终求得该充电站的总体得分。将所得到的各项权重数据与传统 AHP 相比较, 结果表明了改进模糊层次分析法的科学性、可行性, 可作为充电站模糊综合评价的依据。但该方法依然受主观因素影响, 需作进一步改进。

关键词: 电动汽车; 充电站; 综合性能; 层次分析法; 模糊综合评价

1 引言

化石燃料的短缺和国家对新能源汽车的大力扶持, 加快了电动汽车的发展。电动汽车充电基础设施的部署工作也在各处进行, 在全国范围形成完整电动汽车充电网络已是大势所趋。充电站的选址、规划、建设与运营、充电站的安全性好坏都需要有科学的评价体系作为参考, 制定合理的综合性能评价方法对于充电站的建设与性能优劣评判具有重要的指导意义。

对于充电站的建设、选址、规划、经济能效评估和单个充电桩的综合性方面, 国内已有一些研究成果。文献[1]使用博弈论的方法优化和分析了电动汽

车充电站的建设与选址; 文献[2]利用粒子群优化算法和加权伏罗诺伊图对充电站进行优化规划; 文献[3]使用 AHP-熵权法对电动充电站建设和经济运行做出评估; 文献[4]利用投影追踪理论对电动汽车单个充电桩的综合性能做出分析; 文献[5]运用层次分析法 (AHP) 对电动汽车充电机的安全性做出评价; 文献[6]提出一种将多层次模糊分析法和专家打分方法相结合, 最终得出充电站总体得分的评价体系。由于文献[6]对电动汽车综合性能的评价评价采用的是传统 AHP, 必须检验判断矩阵的一致性, 达到可接受的一致性范围。在进行多指标评价时, 进行一致性检验时, 很不容易达到期望值, 需反复调整来满足一致性范围, 导致计算量复杂。而改进的 fuzzy-AHP 由于模糊一致性矩阵本身具有一致性要求, 很好的避开了一

致性检验的繁琐步骤 [7],且把用和行归一法求得的排序向量作为特征值的迭代初值代入,收敛速度极大提升,最终迭代次数大大减少。最后,结合某市快充充电站的算例分析,得出充电站最终总体得分,证实了该方法在进行充电站模糊综合主观评价时的科学性、可行性。

2 改进的模糊层次分析法的原理

(1)改进模糊层次分析法的原理^[7-8]和实施步骤如下:

$$f_{ij} = \begin{cases} 0.5 & s_i = s_j \\ 1 & s_i > s_j \\ 0 & s_i < s_j \end{cases} \quad (1)$$

s_i 和 s_j 分别表示因素 a_i 和 a_j 两者重要性程度, F 为模糊互补矩阵。

(2)对矩阵 F 按行进行求和得 $r_j = \sum_{i=1}^n f_{ij}$,对 F 做出如下改变:

$$r_{ij} = [(r_i - r_j) / 2n] + 0.5 \quad (2)$$

求得模糊一致性判断矩阵 $R_{ij} = [r_{ij}]_{n \times n}$

(3)利用转化公式:

$$r_{ij} = [(r_i - r_j) / 2n] + 0.5 \quad (3)$$

将互补型判断矩阵 $R_{ij} = [r_{ij}]_{n \times n}$ 变为互反型矩阵: $E = [e_{ij}]_{n \times n}$ 。

(4)利用和行归一法求排序向量:

$$w^{(0)} = (w^1, w^2, \mathbf{L}, w^n)^T \\ = [\sum_{j=1}^n e_{1j} / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n e_{ij}, \sum_{i=1}^n e_{2j} / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n e_{ij}, \mathbf{L} \\ , \sum_{j=1}^n e_{nj} / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n e_{ij}]^T \quad (4)$$

(5)将求得的排序向量 W^0 作为特征值法的迭代初值 V^0 进行迭代计算,求解满足迭代精度 V^k 。输入的特征向量初值 $V_0 = (V_{01}, V_{02}, \dots, V_{0n})^T$, 利用迭代公式:

$$V^{k+1} = EV^k \quad (5)$$

(6)求特征向量 V^{k+1} , 并求解 V^{k+1} 的无穷范数 $\|V^{k+1}\|_\infty$; 若 $|\|V^{k+1}\|_\infty - \|V^k\|_\infty| < \epsilon$, 则 $\|V^k\|_\infty$ 即为最大特征值 I_{\max} , 将 V^{k+1} 归一化处理:

$$V^{k+1} = [V_{k+1,1} / \sum_{i=1}^n V_{k+1,i}, V_{k+1,2} / \sum_{i=1}^n V_{k+1,i}, \mathbf{L}, V_{k+1,n} / \sum_{i=1}^n V_{k+1,i}]^T \quad (6)$$

得到的排序向量 $W^k = V^{(k+1)}$, 即为排序向量, 迭代结束。若不满足要求, 以

$$V_k = V_{k+1} / \|V_{k+1}\|_\infty \\ = [V_{k+1,1} / \|V_{k+1}\|_\infty, V_{k+1,2} / \|V_{k+1}\|_\infty, \dots, V_{k+1,n} / \|V_{k+1}\|_\infty]^T \quad (7)$$

作为新的初值再次迭代。

3 电动汽车充电站模糊综合评价

3.1 层次结构模型的建立

层次分析法是把评价的对象分解成目标、准则、指标等层次, 逐层两两比较之间关联, 最后确定各指标相对目标权重的方法。本文将充电站层次结构模型分为三层:

1、第一层为目标层, 目的是完成电动汽车充电站模糊综合主观评价。

2、第二层为准则层, 充电站在为电动汽车提供电量时, 需考虑它的能源供应能量、供应效率、供应可靠性; 电网工作时, 需考虑网络承受能力; 最后得确保为客户满意服务。本文决定将容量评估指标、效率指标、可靠性指标、负荷特性指标、用户体验指标这 5 项指标设定为准则层。

3、第三层为指标层, 主要是针对第二层准则层, 根据各准则层侧重点不同, 提出的指标集。电动汽车充电站层次结构模型如表 1 所示。

Table 1. Comprehensive performance hierarchy model of charging station

表 1. 充电站综合性能层次结构模型[6]

目标层 A	准则层 R	指标层 V
电动汽车充电站综合性能评价	容量评估指标 R ₁	设备利用小时 V ₁
		平均负荷系数 V ₂
		需用系数 V ₃
		站用电率 V ₄
	效率指标 R ₂	充电效率 V ₅
		功率因素 V ₆
		单位面积输出电量 V ₇
		单枪输出电量 V ₈

	可靠性指标 R ₃	充电计划完成率 V ₉
		平均无故障时间 V ₁₀
		平均故障修复时间 V ₁₁
	负荷特性指标 R ₄	设备利用率 V ₁₂
		典型日峰谷差率 V ₁₃
		典型日负荷率 V ₁₄
		季不均系数 V ₁₅
	用户体验指标 R ₅	尖峰负荷持续时间 V ₁₆
		噪声 V ₁₇
		平均排队时间 V ₁₈
平均充电时间 V ₁₉		

3.2 构造优先判断矩阵并计算排序向量

通过准则层和指标层各指标两两之间的重要程度的对比，建立的优先判断矩阵如下。

A-R 判断矩阵

$$\begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 1 \\ 1 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 1 \\ 1 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

R1-V 判断矩阵

$$\begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0.5 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

R2-V 判断矩阵

$$\begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0.5 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

R3-V 判断矩阵

$$\begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 1 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

R4-V 判断矩阵

$$\begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0.5 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.5 \end{bmatrix}$$

R5-V 判断矩阵

$$\begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 1 & 0.5 & 1 \\ 1 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

以 A-R 为例按上面步骤进行计算，得到的模糊一致判断矩阵为:

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} 0.5000 & 0.3000 & 0.3000 & 0.3000 & 0.6000 \\ 0.7000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.8000 \\ 0.7000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.8000 \\ 0.7000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.8000 \\ 0.4000 & 0.2000 & 0.2000 & 0.2000 & 0.5000 \end{bmatrix}$$

利用和行归一法求得的排序向量为:

$$W^0 = (0.1600, 0.2400, 0.2400, 0.2400, 0.1200)$$

互反判断矩阵为:

$$E = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.4286 & 0.4286 & 0.4286 & 1.5000 \\ 2.3333 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 4.0000 \\ 2.3333 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 4.0000 \\ 2.3333 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 4.0000 \\ 0.6667 & 0.2500 & 0.2500 & 0.2500 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

运用 MATLAB 进行迭代计算，迭代的精度为 0.0001，经过 5 次迭代后满足要求，从而可以得到准则层的各指标权重为:

$$W = (0.1137, 0.2721, 0.2721, 0.2721, 0.0699)$$

对指标层的各指标权重作相同计算，结果如表 2 所示。从表 2 可以看出，在准则层中，效率指标、可靠性指标、负荷特性指标同样重要，说明了人们对这三个标准的重视；在指标层中，设备利用时间、充电效率、平均无故障时间、典型日峰谷差率、平均排队时间最为重要，符合人们对于充电站的综合评价关注的是其高效性和经济性理念。

Table 2. Weight of comprehensive performance evaluation index of electric vehicle
表 2. 电动汽车综合性能评价指标权重

目标层 A	准则层 R	权重	指标层 V	权重	专家评价				
					差	合格	中	良	优
电动汽车充电站综合性能评价	容量评估指标 R ₁	0.1136	V ₁	0.4952	0	0	0.5	0.5	0
			V ₂	0.2670	0	0	0.9	0.1	0
			V ₃	0.1541	0	0.8	0.2	0	0
			V ₄	0.0837	0	0	0.5	0.5	0

	效率指标 R ₂	0.2721	V ₅	0.4262	0	0.6	0	0.4	0
			V ₆	0.2520	0	0.8	0	0.2	0
			V ₇	0.1299	0	0.6	0.4	0	0
			V ₈	0.1299	0	0	0.9	0.1	0
			V ₉	0.0621	0	0.9	0.1	0	0
	可靠性指标 R ₃	0.2721	V ₁₀	0.6000	0	0.7	0	0.3	0
			V ₁₁	0.2000	0	0.5	0.5	0	0
			V ₁₂	0.2000	0	0	0.4	0.6	0
	负荷特性指标 R ₄	0.2721	V ₁₃	0.4952	0	0	0.5	0.5	0
			V ₁₄	0.2670	0	0.5	0	0.5	0
			V ₁₅	0.0837	0	0.2	0	0.8	0
			V ₁₆	0.1541	0	0	0.7	0.3	0
	用户体验指标 R ₅	0.0699	V ₁₇	0.0888	0	0.2	0.8	0	0
			V ₁₈	0.5591	0	0	0.1	0.9	0
			V ₁₉	0.3522	0	0.5	0.5	0	0

3.3 改进的 fuzzy-AHP 方法与传统 AHP 的对比分析

将所得的数据与文献的数据作对比分析，如表 3 所示。从表 3 可以看出，两种方法对于同一目标层的判断虽然存在不同的偏差，但偏差的结果不大；且各指标趋势一致，都说明了效率指标、可靠性指标、负

荷特性指标的绝对重要性。对比准则层中可靠性指标中的三项指标层，两种方法评价结果一样，说明了改进的 fuzzy-AHP 在评价指标层时依然具有科学性和可信性。不同的是改进的 fuzzy-AHP 方法由于自身模糊矩阵一致性，不需要像传统 AHP 为解决一致性问题反复迭代，节省运算时间，准确度和精度也有改善。

Table 3. The date of improved fuzzy-AHP compared with traditional AHP

表 3. 改进的 fuzzy-AHP 与传统 AHP 的数据对比

目标层 A	准则层 R	权重		指标层 V	权重	
		改进 fuzzy-AHP	AHP		改进 fuzzy-AHP	AHP
电动汽车充电站综合评价	容量评估指标 R ₁	0.11364	0.09521	V ₁	0.49521	0.47855
				V ₂	0.26700	0.21658
				V ₃	0.15413	0.19658
				V ₄	0.08366	0.10829
	效率指标 R ₂	0.27214	0.28573	V ₅	0.42616	0.45855
				V ₆	0.25200	0.22928
				V ₇	0.12986	0.12179
				V ₈	0.12986	0.12179
				V ₉	0.06213	0.06859
	可靠性指标 R ₃	0.27214	0.28573	V ₁₀	0.60000	0.60000
				V ₁₁	0.20000	0.20000
				V ₁₂	0.20000	0.20000
				V ₁₃	0.49521	0.35620
	负荷特性指标 R ₄	0.27214	0.28573	V ₁₄	0.26701	0.32500
				V ₁₅	0.08366	0.12510
				V ₁₆	0.15413	0.19370
				V ₁₇	0.08876	0.10000
	用户体验指标 R ₅	0.06993	0.0476	V ₁₈	0.55909	0.60000
				V ₁₉	0.35215	0.30000

3.4 评价等级集合的确定

本文采用文献[9]提出的 10 分制评分方法和评分的模糊判断矩阵来确定评价集, 总体评分值 1、3、6、8、10 代表电动汽车充电站差、合格、中、良和优五个等级; 评分的模糊判断矩阵由某个等级的专家人数占总专家人数的比率确定。(假设有 10 位参加评判的专家中有 5 位专家评判为良, 良的权重为 0.5)。模糊判断矩阵和评价集分别如表 2 和表 4 所示。

Table 4. Comprehensive performance evaluation of electric vehicles
表 4. 电动汽车充电站综合性能评价集

评价集	优	良	中	合格	差
分数	10	8	6	3	1

3.5 电动汽车充电站综合性能评价结果的确定

本文选取文献某市 24 小时电动汽车快速充电站的各项指标值为例做出算例分析。通过改进模糊分析法算出的各层权重和专家所做出的模糊评分判断矩阵如表 2 所示, 具体实施步骤如下:

1、求出各指标层的评分向量:

$$B_i = w_{i_r} \times R_i \quad (8)$$

式中的 w_{i_r} 表示指标层各指标对应的权重; R_i 指专家所做出的模糊评分判断矩阵)

2、形成准则层的评分向量

$$B = [B_1, B_2, B_3, \dots, B_n]^T \quad (9)$$

3、求出目标层的评分矩阵

$$A = w_{2_i} \times B \quad (10)$$

式中 w_{2_i} 表示各准则层对应的权重。

4、求出最终的总体评分

$$K = A \times S^T \quad S = [1 \ 3 \ 6 \ 8 \ 10] \quad (11)$$

由式 (8) 和 (9) 可求出

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0.1233 & 0.5606 & 0.3161 & 0 \\ 0 & 0.5911 & 0.1750 & 0.2339 & 0 \\ 0 & 0.5200 & 0.1800 & 0.3000 & 0 \\ 0 & 0.1502 & 0.3555 & 0.4943 & 0 \\ 0 & 0.1938 & 0.3030 & 0.5032 & 0 \end{bmatrix}$$

由式 (10) 可得到目标层的评分矩阵为

$$A = [0 \ 0.3708 \ 0.2783 \ 0.3509 \ 0]$$

由式 (10) 可求出最终的总体评分 $K=5.5894$, 总体评分分值介于表 4 评价集的合格 (分数为 3) 和中等 (分数为 6) 之间, 说明该充电站处于中等偏下标准, 该充电站要做出改善。

4 结论

(1) 与传统的 AHP 相比较, 两种方法对于同一目标层的判断虽然存在不同的偏差, 但偏差的结果不大; 且各指标趋势一致, 都说明了效率指标、可靠性指标、负荷特性指标的绝对重要性。说明改进的 fuzzy-AHP 方法能够反应专家的思维模糊性, 对于电动汽车充电站模糊综合主观评价, 依然具有科学性和可行性。

(2) 改进的 fuzzy-AHP 能准确的求出电动汽车充电站综合性能准则层和指标层的各项指标权重, 且具有迭代次数少、精度高, 结果准确性高的特点。

(3) 通过对快速充电站的算例分析, 求出该市快速充电站的最终综合总体评分 K 值为 5.5894, 得出该充电站处于中等偏下标准, 说明该充电站要做出改善。该方法可作为评判充电站的依据, 由于专家打分的模糊性, 评分的结果仍受专家倾向主观因素的影响, 需作进一步改进。

References (参考文献)

- [1] Zhang J. Construction and Site Selection of Electric Vehicle Charging Station. Agricultural Equipment and Vehicles Engineering, 2016, 54, 11, 63-66.
张进. 电动汽车充电站建设与选址[J]. 农业装备与车辆工程, 2016, 54, 11, 63-66.
- [2] Tang X.G., Liu J.Y., Liu Y. B., Feng H., XIE L.F., MA W. Power station planning for electric vehicles based on computational geometry. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36, 08, 24-30.
唐现刚, 刘俊勇, 刘友波, 冯瀚, 谢连方, 马玮. 基于计算几何方法的电动汽车充电站规划. 电力系统自动化, 2012, 36, 08, 24-30.
- [3] Jia L.G., Yang J. Energy-efficiency evaluation of EV charging station based on AHP-entropy method. Electric Power Construction, 2015, 36, 07, 209-215.
贾乐刚, 杨军. 基于 AHP-熵权法的电动汽车充电站运行能效评估. 电力建设, 2015, 36, 07, 209-215.
- [4] Fan J.L., Liu J. Study on comprehensive evaluation method of charging pile for electric vehicle. Electric Application, 2014, 33, 11, 31-35.
范建磊, 刘君. 电动汽车充电桩综合评价方法研究. 电气应用, 2014, 33, 11, 31-35.
- [5] Wang X.Q., Niu L.Y., Huang J., Jiang C.C. Research on evaluation system of electric and safety performance of electric vehicle charger. Power Technology, 2014, 38, 04, 734-736.
王晓强, 牛利勇, 黄彧, 姜久春. 电动汽车充电机电气与安全性能评价体系研究. 电源技术, 2014, 38, 04, 734-736+744.
- [6] Liu C., LI Y., Xia L., LI H., LI B., MA X.F., Zhang J. Comprehensive Performance Evaluation of EV Charging Station. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2017, 44, 01, 88.
刘畅, 李颖, 夏露, 李昊, 李斌, 麻秀范, 张晶. 电动汽车充电站综合性能评价. 华北电力大学学报(自然科学版), 2017, 44, 01, 82-88.
- [7] Teng J.D., Xiang M.J., Li S., LI X.H. An Empirical Analysis Based on Fuzzy AHP Method for Determining the Weight of Geological Hazard Evaluation Index. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 01, 22-23.

-
- 滕继东,项梦杰,李苏,李小虎.改进模糊层次分析法确定地质灾害危险性评价指标权重的研究. 安徽农业科学, 2008, 01, 22-23.
- [8] Kang Q.R., Tan J.X., Zhang W.Z. Application of Improved Fuzzy Analytical Hierarchy Process in Landslide Management Optimization [J]. *Journal of Chongqing University*, 2010,33, 09, 98-103.
康钦容,唐建新,张卫中.改进模糊层次分析法在滑坡治理方案优化中的应用. 重庆大学学报,2010,33, 09, 98-103.
- [9] Zhao Y.Q., Liu Y.j. Subjective Comprehensive Evaluation of Vehicle Handling Stability Based on Improved Fuzzy AHP Method. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24, 18, 2519-2523.
赵又群,刘英杰.基于改进模糊层次分析法的汽车操纵稳定性主观综合评价. 中国机械工程, 2013, 24, 8, 2519-2523.