DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.5.152 **中图分类号**：TM615 **文献标志码**：A

基于最小鉴别信息组合赋权法的光伏发电单元综合评价技术研究

张 建(中国电源学会会员)，夏 烈，徐亮辉，杨青斌，董 玮(中国电源学会会员)
(中国电力科学研究院有限公司新能源与储能运行控制国家重点实验室，北京 100192)

摘要：为进一步优化我国资源结构、降低能源缺口、缓解环境污染等问题，光伏发电项目亟需建立科学的评价与决策机制，完善光伏电站综合性能评价体系，促进整个社会能源系统的可持续发展。重点围绕光伏发电单元的综合评价技术开展研究，基于“多准则、多层次、多因素”决策的基本原则，提出1种适合于光伏发电单元的综合评价体系和评价方法，综合考虑客观权重法和主观权重法的优缺点，利用“最小鉴别信息原理”计算组合权重，并建立光伏发电单元的综合评价模型，对新型光伏中压发电单元和常规光伏发电单元的综合评价结果进行对比分析，证明新型中压光伏发电单元设计指标的优越性。

关键词：光伏发电单元；综合评价技术；评价体系；评价方法；组合赋权法

Research on Comprehensive Evaluation Technology for Photovoltaic Power Generation Unit Based on Combined Weighting Method of Minimum Discriminant Information

ZHANG Jian, *Member, CPSS*, XIA Lie, XU Lianghui, YANG Qingbin, DONG Wei, *Member, CPSS*
(State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: To further optimize the resource structure, reduce the energy gap and alleviate environmental pollution in China, a scientific evaluation and decision-making mechanism of photovoltaic (PV) power generation projects is in urgent need of establishment, and the comprehensive performance evaluation system of PV power stations should to be improved to promote the sustainable development of the whole social energy system. Focused on the comprehensive evaluation technology for PV power generation units. Based on the basic principle of “multi-criteria, multi-level and multi-factor” decision-making, a comprehensive evaluation system and an evaluation method suitable for PV power generation units are proposed, which comprehensively consider the advantages and disadvantages of objective and subjective weight methods. The principle of minimum discriminant information is used to calculate the combined weight, and a comprehensive evaluation model for PV power generation units is established to compare and analyze the comprehensive evaluation results of a novel PV medium-voltage power generation unit and a conventional PV power generation unit, thus proving the superiority of the design indexes for the novel unit.

Keywords: Photovoltaic (PV) power generation unit; comprehensive evaluation technology; evaluation system; evaluation method; combined weighting method

随着社会对环保问题的愈加重视及科技水平的不断提升，太阳能光伏发电技术水平也得到巨大提升，太阳能光伏资源已经成为世界多个国家生产生活的主要能源来源[1]。截止2021年底，我国光伏市场累计装机量为3.06亿kW，其中2021年新增装机量为5 488万kW，占全国新增装机的31.1%，

收稿日期：2022-08-08；**修回日期**：2022-10-04，2022-10-16；
录用日期：2022-10-21；**网络首发日期**：2022-12-30
基金项目：海南省重大科技计划资助项目(ZDKJ2020013)
This work is supported by Major Science and Technology Projects of Hainan Province under the grant ZDKJ2020013

占全国总发电量的 12.9%。“十四五”期间，预计光伏累计装机量的年均复合增长率约为 18.9%，年均新增装机 67.4 GW，到 2025 年装机累计达 581 GW。太阳能作为 1 种绿色环保的清洁能源[2]，资源总量相当丰富，应用前景被广泛看好，但是太阳能的利用受气候、地理位置等条件的影响较大，且能量密度较低，因而太阳能利用也面临着诸多困难。

在光伏发电评价技术研究方面，文献[3]考虑了光伏电站并网技术和自身运行技术特点，采用层次分析法构建了光伏电站技术性能评价指标体系；文献[4]结合国内的能源结构和光伏发电的发展现状，利用专家决策和用户调研法从经济效益、社会效益、低碳效益 3 个方面对广州从化明珠光伏发电项目的综合效益进行评价；文献[5]研究了光伏发电项目自身在建设和运营期间存在的环境影响问题，采取模糊综合评价法从多个方面针对事物的隶属等级状况对项目的整体环境影响进行评价。针对上述研究，目前国内外光伏发电评价体系多数以单一的技术性能、经济效益或社会环境评价为主，对光伏发电项目的整体评价研究较少，同时尚未指明评价指标来源和缺乏指标评价依据。而通常情况下光伏发电技术性能的优劣直接影响光伏电站建设和投运的度电成本、投资方的收益情况及碳排放量等[6-7]，因此建立全面合理的评价体系，是开展光伏发电单元综合评价的基本前提。此外，上述研究提到的光伏发电评价方法通常以单一的主观评价法或客观评价法为主，其单一决策存在较大的判断偏差，且具有一定的片面性，有必要对评价对象选取科学有效的评价方法，实现光伏发电单元综合评价的有效落地。因此，亟需研究并提出 1 套兼顾各方、便于实施的光伏发电单元评价体系和评价方法，即光伏发电单元综合评价技术[8-13]，以更好地支撑光伏行业持续快速健康发展。

本文将围绕光伏发电单元综合评价技术开展研究。首先，基于“多准则、多层次、多因素”决策的基本原则，提出 1 种适合于光伏发电单元的综合评价体系，依据相关标准和规范对评价指标进行量化分级；然后，综合考虑客观权重法和主观权重法的优缺点，利用最小鉴别信息组合赋权法进行组合权重计算，并建立光伏发电单元的综合评价模型；最后，利用新型光伏中压发电单元和常规光伏发电单元开展综合评价，分析结果验证了新型中压光伏发电单元设计指标的优越性。

1　光伏发电单元综合评价体系

1.1　综合评价体系构建

综合评价体系由多项指标组合而成，目标是构建全面、科学、合理的指标评价体系。光伏发电项目综合评价体系遵循“多准则、多层次、多因素”的基本原则，其所选的评价指标可量化，既考虑客观因素也考虑专家主观意见，能够同时结合主客观 2 方面进行评价。考虑到光伏发电单元在投资成本、发电特性及运行过程中的特点，本文将所提出的综合评价体系分为 3 项一级指标和 13 项二级指标，其综合评价体系结构如图 1 所示。

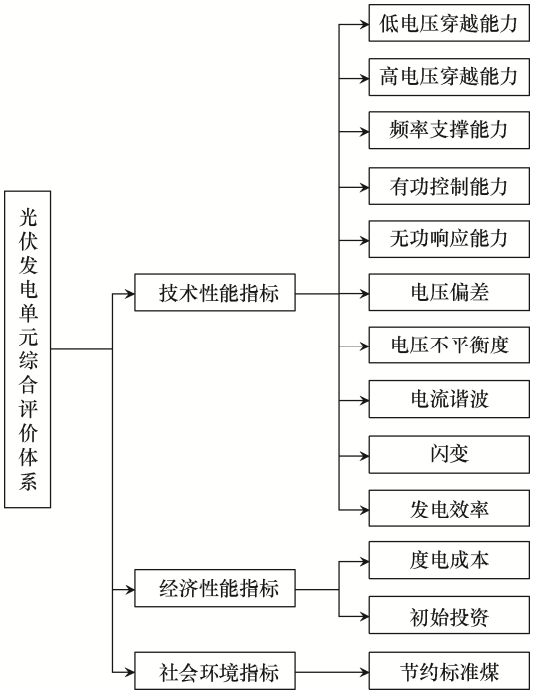


图 1　综合评价指标体系

Fig. 1 Comprehensive evaluation index system

将第一层级指标分为 3 类，包括技术性能指标、经济效益指标和社会环境指标。其中，技术性

能指标包含 10 项二级指标，经济效益指标包括 2 项二级指标，社会环境效益指标包含 1 项二级指标。

(1)技术性能指标根据发电单元可靠性、产品运行特性及综合转换效率等特点，划分为低电压穿越能力指标、高电压穿越能力指标、频率支撑能力指标、有功控制能力指标、无功响应能力指标、电压偏差指标、电压不平衡度指标、电流谐波指标、闪变指标、发电效率指标。

(2)经济效益指标通常包括电站投资成本、售电电价、单位电量收益、销售税金及附加、节能降耗情况、内部收益率、投资回收期、资产负债率、资金平衡率、平准化度电成本等。考虑到上述指标存在一定的关联性和差异性，同时带有明显的地域性或政策性，本文的经济性指标重点关注平准化度电成本和单位千万初始投资 2 项指标，前者代表项目整个生命周期的成本预期，后者代表项目建设初期的成本预期。

(3)社会环境指标从项目整个生命周期来分析，光伏发电单元对社会环境的影响主要是光伏电站建设过程中的运输、施工产生的排放，光伏电站发电过程中的废气、废水排放与能耗及光伏电站运行过程中产生的污染物排放等。考虑到光伏电站在节约土地资源或者复合利用土地资源方面也有相应的贡献，社会环境指标以单位装机容量发电量为计算基础，折算出节约标准煤指标。

1.2 评价指标等级划分

综合评价体系是在指标体系可量化的基础上依据各项国家标准和行业规范综合建立起来的，其具有理论性和实践性。针对本文提出的光伏发电单元综合评价体系，其低电压穿越能力指标、高电压穿越能力指标参照 GB/T 37408—2019《光伏发电并网逆变器技术要求》[14]的故障穿越期间逆变器输出动态无功电流与电压变化比例值 K_1 和 K_2；频率支撑能力指标参照《西北调控〔2018〕225 号文》[15]和 GB/T 40595—2021《并网电源一次调频技术规定及试验导则》[16]的快速频率响应合格率；有功控制能力指标参照 GB/T 40289—2021《光伏发电站功率控制系统技术要求》[17]的有功功率的控制偏差值；无功响应能力指标参照 GB/T 37408—2019《光伏发电并网逆变器技术要求》[18]的动态无功响应时间；电压偏差指标参照 GB/T 29321—2012《光伏发电站无功补偿技术规范》[19]的电压偏差限值；电压不平衡度指标参照 GB/T 15543—2008《电能质量 三相电压不平衡》[20]的电压不平衡度限值；电流谐波指标参考 GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》[21]的总谐波畸变率；闪变指标参照 GB/T 12326—2008《电能质量 电压波动和闪变》[22]的长时间闪变限值；发电效率指标、平准化度电成本指标和单位千万初始投资指标参考光伏电站数据统计经验值；节约标准煤指标则通过单位装机容量发电量计算得出。上述 13 项评价指标的限值见表 1。

表 1 评价指标限值

Tab. 1 Limits of evaluation indexes

评价指标	限值
低电压穿越能力	1.5~2.5
高电压穿越能力	0~1.5
频率支撑能力	≥60%
有功控制能力	<±1%
无功响应能力	≤60 ms
电压偏差	<±10%
电压不平衡度	<2%
电流谐波	<5%
闪变	<1
发电效率	0.82~0.93
度电成本	<0.375 3
初始投资	<3.998
节约标准煤	>384.65

将上述各指标的基础数据根据该指标在相关标准或规范中的相关限值依次划分为“优质”、“良好”、“一般”、“合格”、“不合格”5 个区间等级，基础数据指标量化分级见表 2。

表 2 基础数据指标量化分级

Tab. 2 Quantitative classification of basic data of indexes

分级	量化值
优质	10.00
良好	8.75
一般	7.50
合格	6.25
不合格	5.00

2　光伏发电单元综合评价方法

综合评价技术的基本组成要素主要包括评价对象、评价指标、指标权重、综合评价模型 4 个方面。第 1 节提出的综合评价体系对评价对象和评价指标进行量化分级，下面重点对指标权重计算和综合评价模型构建进行研究。

2.1　最小鉴别信息组合赋权计算

在多属性决策中，指标权重的确定是 1 个不可或缺的环节，计算方法有主观赋权法和客观赋权法 2 种，但各有其优缺点，主要影响其权重的计算精度。

主观赋权法是 1 种专家评判法，其优点是多位决策专家根据实际的决策问题或自身的知识经验合理地确定各项属性权重的排序，通过计算均值和方差观察专家决策的离散程度，一般不会出现属性权重与属性实际重要程度相悖的情况，更贴近评价主体的主观意愿。但决策或评价结果具有较强的主观随意性和局限性，且增加决策者的负担。主观赋权法通常采用层次分析法和优序图法来计算基础权重。

客观赋权法是利用原始数据之间的关系来确定权重，具有很强的客观性和数学理论支撑。但该方法没有考虑决策者的主观意向，计算权重结果可能出现与人们的主观意愿或实际情况不一致的情况。从理论上讲，在多属性决策中，最不重要的属性可能具有最大的权重，而最重要的属性却不一定具有最大的权重，其依赖于实际的决策问题，通用性和决策人的可参与性较差，没有考虑决策人的主观意向，且计算量较大。客观赋权法通常采用熵权法和变异系数法来计算基础权重。

由于单一的决策统计法可能会出现较大的决策偏差，所以决策属性的主观权重和客观权重的合理组合是多属性决策的关键问题。因此，本文采用层次分析法 AHP(analytical hierarchy process)[23]、优序图法 PC(precedence chart)[24]2 种主观赋权法，熵权法(EP)[25]、变异系数法 CV(coefficient of variation)[26]2 种客观赋权法分别得到各评价指标的主观和客观基础权重，以“鉴别信息最小”为优化目标计算组合权重 CW(combination weight)，该方法既考虑到决策者的主观偏好，又兼顾到实际数量特征的客观性，计算结果更具科学性。其中，最小鉴别信息原理是指当决策者仅掌握先验概率分布或部分统计信息时，以先验分布与目标分布的鉴别信息最小作为目标函数对已有统计数据加以整合分析，使其目标分布在满足多种约束条件下最接近于概率分布，从而对整体分布规律做出判断[27]。

2.2　综合评价模型构建

图 2 为综合评价模型构建流程。首先基于决策专家的判断经验，构建判断矩阵，分别根据层次分析法和优序图法计算主观基础权重；根据原始基础数据落在各项指标的概率，得到 n 个指标在 m 个区间等级内出现的概率，构建原始数据矩阵 $\boldsymbol{X}$，即

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} P_1(1) & \cdots & P_1(n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_m(1) & \cdots & P_m(n) \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中，$P_i(j)$ 为第 j 个指标在第 i 个量化区间内出现的概率值，i=1, 2,⋯, m，j=1, 2,⋯, n，m 为评价指标量化区间数，n 为评价指标数量。

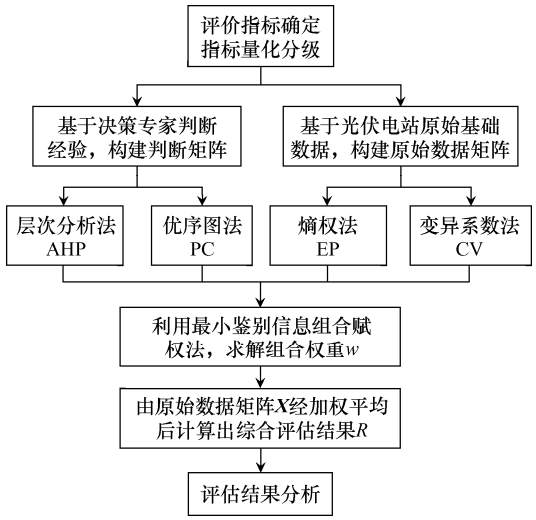


图 2　综合评价流程

Fig. 2 Flow chart of comprehensive evaluation

如式(1)所示，分别根据熵权法和变异系数法

计算客观基础权重。然后基于“最小鉴别信息原理[28]”，以“组合权重总和为 1”为等式约束条件，即

$$\begin{cases} \min f = \sum_{j=1}^{n}\sum_{l=1}^{p} w_j \ln\dfrac{w_j}{w_{lj}} \\ \text{s.t.}\sum_{j=1}^{n} w_j = 1 \qquad w_j \geqslant 0 \end{cases} \tag{2}$$

最后通过拉格朗日乘子法求解优化模型，得到组合权重 w_j，即

$$w_j = \frac{\left[\prod_{l=1}^{p} w_{lj}\right]^{1/p}}{\sum_{j=1}^{n}\left[\prod_{l=1}^{p} w_{lj}\right]^{1/p}} \tag{3}$$

式中：w_{lj} 为第 l 种基础权重计算法的第 j 项指标的权重值，l=1, 2, ⋯, p，p 为基础权重赋权法的种类数；w_j 为组合权重值，即第 j 个指标的组合权重值。

由原始基础数据获得的概率值 $P_i(j)$经加权平均后得到指标评价结果 R，即

$$R = \sum_{j=1}^{n}\left(w_j \cdot \sum_{i=1}^{m}(\boldsymbol{\beta}\cdot P(j)) / \sum_{i=1}^{m} P_i(j)\right) \tag{4}$$

式中，依据表 2 所示的评价指标量化分级情况，取向量 $\boldsymbol{\beta}$=[10 8.75 7.5 6.25 5]。评价结果分级见表 3，根据表 3 判断评价结果 R 的区间分级，其评估结果越大越好。

表 3 评估结果分级

Tab. 3 Classification of evaluation result

等级	评估结果
优质	9~10
良好	8~9
一般	7~8
合格	6~7
不合格	<6

3 算例分析

按照地理因素、资源分布相近的原则选取安徽省内 10 座光伏电站作为基础数据统计样本(m=5，n=13，p=4)，利用表 2 所示的基础数据指标量化分级表对统计样本进行量化分级，具体量化分级结果见表 4。

表 4 光伏电站基础数据量化分级结果

Tab. 4 Quantitative classification result of basic data for photovoltaic power station

电站编号	指标 1	指标 2	指标 3	指标 4	指标 5	指标 6	指标 7	指标 8	指标 9	指标 10	指标 11	指标 12	指标 13
A	5.00	5	8.75	8.75	8.75	6.25	8.75	8.75	8.75	6.25	8.75	7.50	6.25
B	5.00	10	10.00	6.25	8.75	7.50	8.75	8.75	10.00	6.25	8.75	6.25	8.75
C	5.00	10	10.00	10.00	8.75	8.75	10.00	8.75	10.00	6.25	7.50	7.50	8.75
D	10.00	5	10.00	10.00	8.75	7.50	10.00	8.75	10.00	7.50	6.25	8.75	7.50
E	10.00	10	10.00	10.00	8.75	10.00	8.75	7.50	10.00	8.75	10.00	10.00	10.00
F	5.00	10	10.00	6.25	8.75	8.75	8.75	8.75	10.00	6.25	8.75	8.75	7.50
G	6.25	5	10.00	10.00	8.75	7.50	10.00	6.25	10.00	7.50	10.00	6.25	10.00
H	6.25	10	10.00	8.75	7.50	8.75	10.00	8.75	10.00	6.25	10.00	8.75	8.75
I	10.00	10	8.75	10.00	8.75	7.50	10.00	8.75	10.00	6.25	7.50	6.25	8.75
J	5.00	5	8.75	8.75	8.75	8.75	8.75	7.50	10.00	6.25	8.75	8.75	10.00

根据式(1)计算出原始数据概率矩阵 $\boldsymbol{X}$，具体数值为

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.5 & 0.7 & 0.5 & 0 & 0.1 & 0.5 & 0 & 0.9 & 0 & 0.3 & 0.1 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.3 & 0.9 & 0.4 & 0.5 & 0.7 & 0.1 & 0.1 & 0.4 & 0.4 & 0.4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.4 & 0 & 0.2 & 0 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \\ 0.2 & 0 & 0 & 0.2 & 0 & 0.1 & 0 & 0.1 & 0 & 0.7 & 0.1 & 0.3 & 0.1 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{5}$$

根据专家决策意见得到主观权重 w_{AHP} 和 w_{PC}，基于原始数据矩阵计算客观权重 w_{EP} 和 w_{CV}，利用最小鉴别信息组合赋权法计算出组合权重 w_{CW}，5 种赋权法的权重计算结果见表 5 和图 3。

表 5　5 种赋权法的权重值计算结果

Tab. 5 Calculation results of weight values for five kinds of weighting method

权重值	指标 1	指标 2	指标 3	指标 4	指标 5	指标 6	指标 7	指标 8	指标 9	指标 10	指标 11	指标 12	指标 13
w_{AHP}	0.104 8	0.104 8	0.108 5	0.031 7	0.081 5	0.035 9	0.035 4	0.046 2	0.046 2	0.132 1	0.128 2	0.128 2	0.016 1
w_{PC}	0.094 6	0.094 6	0.112 4	0.065 0	0.076 9	0.023 7	0.023 7	0.047 3	0.047 3	0.147 9	0.130 2	0.130 2	0.005 9
w_{EP}	0.123 7	0.069 7	0.066 5	0.096 5	0.084 3	0.050 1	0.052 5	0.085 8	0.117 6	0.086 7	0.064 0	0.052 5	0.049 9
w_{CV}	0.072 5	0.017 0	0.031 9	0.216 0	0.057 7	0.086 3	0.109 4	0.088 3	0.287 1	0.007 9	0.006 9	0.006 4	0.012 5
w_{CW}	0.120 5	0.072 7	0.088 5	0.100 4	0.092 1	0.054 3	0.058 1	0.079 1	0.114 9	0.075 2	0.064 5	0.060 3	0.019 3

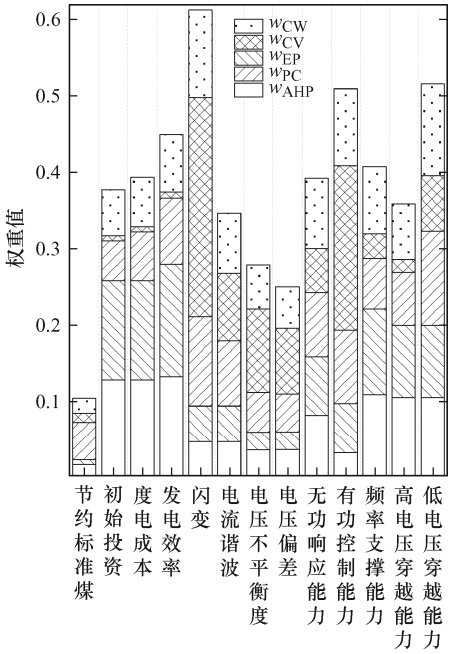


图 3　5 种赋权法的权重计算结果

Fig. 3 Weight calculation results of five kinds of weighting method

参照综合评价模型构建方法，对 10 座光伏电站进行综合评价计算，其综合评价结果见表 6 和图 4。

下面重点对安徽某村 30 MW 渔光互补光伏发电项目(电站 B)和安徽某县光伏复合发电50 MW 项目(电站 E)的光伏发电单元进行综合评价分析，其电站基础参数见表 7。

本文所选 2 个电站的辐照度、年均利用小时数和组件光电转换效率相近，安装方式也相同，其发电单元的重要边界条件相近，主要差别在于光伏逆变器选型不同，从而导致 2 个电站的综合评价结果相差较大。从综合评价指标方面看，相比常规集中式光伏发电单元，新型光伏中压发电单元采用新型的光伏中压逆变器，其低电压穿越能力、有功控制能力、发电效率、度电成本、初始投资及节约标准煤等指标得到有效提升；从综合评价结果来看，

表 6　光伏电站发电性能综合评价结果

Tab. 6 Comprehensive evaluation results of power generation performance of photovoltaic power station

电站编号	AHP	PC	EP	CV	CW
A	7.343	7.433	7.492	8.139	7.578
B	7.906	7.825	7.951	8.214	7.986
C	8.114	8.129	8.427	9.269	8.498
D	8.214	8.276	8.666	9.432	8.733
E	9.573	9.571	9.506	9.560	9.520
F	8.252	8.173	8.083	8.323	8.180
G	7.906	7.981	8.221	8.980	8.223
H	8.584	8.558	8.582	9.042	8.644
I	8.298	8.269	8.835	9.475	8.846
J	7.653	7.678	7.910	8.658	7.907

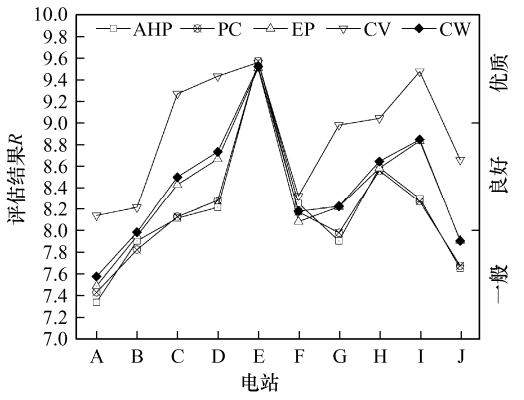


图 4　光伏发电单元综合评价结果

Fig. 4 Comprehensive evaluation results of photovoltaic power generation unit

表 7 电站基础参数

Tab. 7 Basic parameters of power station

参数	电站 B	电站 E
发电单元类型	3.125 MW	6 MW/35 kV 新型光伏中压发电单元
地理位置	安徽铜陵市	安徽池州市
辐照度/(MJ·m^{-2})	4 644	4 690.8
年均利用小时数/h	1 099.0	1 124.3
光伏组件转换效率/%	19.67	19.90
逆变器型号	SG3125HV 集中式逆变器	新型光伏中压组串式逆变器

利用最小鉴别信息组合赋权法计算出 2 个电站的综合评估结果分别为 R=7.986 和 R=9.520，表明电站 B 的综合评价结果为一般，电站 E 综合评价结果为优质，计算结果符合预期。

根据图 3 所示的 5 种赋权法权重计算结果来看，对于高电压穿越能力、频率支撑能力、发电效率、度电成本及初始投资 5 项指标，其主观权重比例系数要明显高于客观权重比例系数，说明专家经验决策该指标属性在综合评价中起到重要作用，但客观赋权法的权重系数计算结果却未能体现，而采用组合赋权法计算出的组合权重系数可满足在多种约束条件下使其组合权重系数与其他 4 种单一权重系数的鉴别信息之和最小，充分体现主客观赋权法的评价指标属性决策。从图 4 所示在 5 种赋权法计算下的光伏发电单元综合评价结果来看，10 座光伏电站的综合评价结果整体趋势基本保持一致，采用组合权重法计算出的综合评价结果介于单一主观赋权法或客观赋权法的综合评价结果之间，可避免单一决策极端值的出现，其更具合理性。

4 结语

本文提出了 1 种适用于光伏发电单元的综合评价体系，梳理出了评价指标等级划分依据，该体系从光伏发电技术性能、经济效益及社会环境影响等多个维度对光伏发电站进行综合评价和横向对比，有利于投资者充分掌握光伏发电站的综合性能，为提升技术、活跃市场和优化政策提供判断依据；同时为统筹兼顾专家决策和客观属性，提出了 1 种基于最小鉴别信息组合赋权法来计算最优权重，利用加权平均计算出综合评价结果，评价结果能够反映光伏电站发电性能的整体情况，从而为光伏电站设计和规划提供判断依据。此外，本文还对新型光伏中压发电单元和常规集中式发电单元进行综合评价和对比分析，验证了所提出的基于最小鉴别信息组合赋权的光伏发电单元综合评价体系和评价方法的可行性和有效性。

参考文献：

[1] 王香云, 申彦波, 李利秋. 中国太阳能资源领域标准的制定综述[J]. 太阳能, 2020(12): 17-23.
Wang Xiangyun, Shen Yanbo, Li Liqiu. Review of formulation of standards in the field of solar energy resources in China [J]. Solar Energy, 2020(12): 17-23. (in Chinese)

[2] Kumar V, Shrivastava R L, Untawale S P. Solar energy: Review of potential green & clean energy for coastal and offshore applications [J]. Aquatic Procedia, 2015, 4: 473-480.

[3] 何红光, 王萍, 周晓青, 等. 灰色多层次综合评价法在光伏电站技术性能评价中的应用[J]. 华北电力技术, 2014(3): 28-33.
He Hongguang, Wang Ping, Zhou Xiaoqing, et al. Application of grey multi-hierarchy comprehensive evaluation in technical performance evaluation of photovoltaic power plants [J]. North China Electric Power, 2014(3): 28-33. (in Chinese)

[4] 冯雯. 经济新常态下光伏电站建设发展与效益评价[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
Feng Wen. Analysis and research on construction and development of photovoltaic power station under the new economic norm [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017. (in Chinese)

[5] 刘中志. 光伏发电项目环境影响评价分析及防治[J]. 资源节约与环保, 2016(8): 8-9.
Liu Zhongzhi. Environmental impact assessment analysis and prevention of photovoltaic power generation project

[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2016(8): 8-9. (in Chinese)

[6] 何滢. 电力企业投资项目经济效益分析与评价[J]. 华北电力大学学报(社会科学版), 2011(S2): 32-36.
He Ying. Analysis and evaluation of economic benefits of investment projects of electric power enterprises [J]. Journal of North China Electric Power University (Social Sciences), 2011(S2): 32-36. (in Chinese)

[7] 安欣. 电力企业投资项目经济效益分析与评价初探[J]. 中国管理信息化, 2018, 21(16): 116-117.
An Xin. Analysis and evaluation of economic benefits of investment projects in electric power enterprises [J]. China Management Informationization, 2018, 21(16): 116-117. (in Chinese)

[8] 马军杰, 张信, 王恩琦, 等. 并网光伏发电价值的综合评价[J]. 水电能源科学, 2011, 29(6): 169-171.
Ma Junjie, Zhang Xin, Wang Enqi, et al. Comprehensive evaluation model of grid-connected photovoltaic generation [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(6): 169-171. (in Chinese)

[9] Fereidooni M, Mostafaeipour A, Kalantar V, et al. A comprehensive evaluation of hydrogen production from photovoltaic power station [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 415-423.

[10] 徐卓华. 安徽省 B 公司分布式光伏发电项目综合评价研究[D]. 蚌埠: 安徽财经大学, 2020.
Xu Zhuohua. Research on comprehensive evaluation of distributed photovoltaic power generation project of Anhui B company [D]. Bangbu: Anhui University of Finance & Economics, 2020. (in Chinese)

[11] 王影. 荒漠化土地光伏电站技术经济综合评价研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
Wang Ying. Study on comprehensive evaluation of technology and economy of photovoltaic power plant in desertification land [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020. (in Chinese)

[12] 孙文达. 自发自用分布式光伏项目综合效益评价[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
Sun Wenda. Use of comprehensive benefit evaluation of self-use distributed PV project [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)

[13] 付亚轩. 基于多准则决策法的光伏发电项目综合效益评价研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
Fu Yaxuan. Research on comprehensive benefit evaluation of photovoltaic power generation projects based on multi-criteria decision method [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019. (in Chinese)

[14] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 光伏发电并网逆变器技术要求: GB/T 37408—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical requirements for photovoltaic gird-connected inverter: GB/T 37408—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019. (in Chinese)

[15] 国家电网公司西北分部办公室. 西北调控〔2018〕225 号 文 [EB/OL]. (2019-01-02)[2022-08-01]. http://www.xianhengrong.cn/down_1/1815263760435986432.html

[16] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 并网电源一次调频技术规定及试验导则: GB/T 40595—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Guide for technology and test on primary frequency control of grid-connected power resource: GB/T 40595—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)

[17] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 光伏发电站功率控制系统技术要求: GB/T 40289—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical requirement of power control system for photovoltaic power station: GB/T 40289—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)

[18] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 光伏发电并网逆变器技术要求: GB/T 37408—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical requirements for photovoltaic gird-connected inverter: GB/T 37408—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019. (in Chinese)

[19] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委

员会. 光伏发电站无功补偿技术规范: GB/T 29321—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical specification for reactive power compensation of PV power station: GB/T 29321—2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013. (in Chinese)

[20] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电能质量 三相电压不平衡: GB/T 15543—2008[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. Power quality - Three-phase voltage unbalance: GB/T 15543—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)

[21] 国家技术监督局. 电能质量 公用电网谐波: GB/T 14549—1993[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
State Bureau of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China. Quality of electric energy supply - Harmonics in public supply network: GB/T 14549—1993 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1994. (in Chinese)

[22] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电能质量 电压波动和闪变: GB/T 12326—2008[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. Power quality - Voltage fluctuation and flicker: GB/T 12326—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)

[23] Cheng E, Li H. Analytic hierarchy process [J]. Measuring Business Excellence, 1997, 5(3): 30-37.

[24] 孙飞虎. 基于优序图法的贵州高校图书馆信息服务评价体系构建研究[D]. 贵阳: 贵州财经大学, 2020.
Sun Feihu. Research on the construction of information service evaluation system of Guizhou university library based on the priority chart method [D]. Guiyang: Guizhou University of Finance and Economics, 2020. (in Chinese)

[25] Mon D L, Cheng C H, Lin J C. Evaluating weapon system using fuzzy analytic hierarchy process based on entropy weight [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1994, 62(2): 127-134.

[26] Faber D S, Korn H. Applicability of the coefficient of variation method for analyzing synaptic plasticity [J]. Biophysical Journal, 1991, 60(5): 1288-1294.

[27] 张国军, 李浩文, 葛群, 等. 基于信息熵的自适应窗长光伏系统直流串联电弧故障识别研究[J]. 电源学报, 2021, 19(5): 214-223.
Zhang Guojun, Li Haowen, Ge Qun, et al. Study on DC series arc faults identification for photovoltaic system with adaptive window length based on information entropy [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(5): 214-223. (in Chinese)

[28] 吴显金, 王润生. 基于最小鉴别信息的正则化图像恢复方法[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(3): 605-607.
Wu Xianjin, Wang Runsheng. Regularized image restoration based on minimum information discrimination [J]. Computer Engineering and Design, 2007, 28(3): 605-607. (in Chinese)



张建

作者简介：

张建(1994—)，男，中国电源学会会员，通信作者，硕士，助理工程师。研究方向：新能源发电试验与检测。E-mail：1508172476@qq.com。

夏烈(1983—)，男，博士，高级工程师。研究方向：新能源发电试验与检测。E-mail：xialie@epri.sgcc.com.cn。

徐亮辉(1988—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：新能源发电试验与检测。E-mail：xulianghui@epri.sgcc.com.cn。

杨青斌(1988—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：新能源发电试验与检测。E-mail：yangqingbin@epri.sgcc.com.cn。

董玮(1987—)，男，中国电源学会会员，博士，高级工程师。研究方向：光伏发电并网及发电性能评估技术。E-mail：dongwei@epri.sgcc.com.cn。

(责任编辑：郭凯凯)