

[光伏选址]

AHP在区域大型光伏电站项目选址中的应用

文/戚浩明
中国电建集团湖北工程有限公司电力工程公司

采用AHP算法计算决策指标的综合权重，结合方案比较的相对优势度确定备选选址点的可信度指数，以此为依据计算备选方案与理想方案的相对贴近度，得到最优区域大型光伏电站项目选址方案。以华能蚕庄120 MW农光互补光伏发电工程为研究背景，对所提的选址策略进行效果验证，表明所提的选址方案能够有效提高光伏电站的发电效率。

光伏电站作为太阳能发电的重要形式，其选址变得越来越关键。区域性大型光伏电站项目的选址不仅影响电站的建设成本和发电效率，还直接影响其长期运营的经济效益和社会效益。传统的光伏电站选址方法往往侧重于单一因素的分析，如光照资源、土地条件等，缺乏对多个因素的综合评价。在处理复杂和不断变化的选址环境时，这种方法往往显得不够充分。因此，有必要引入更科学、系统的选址方法，实现对多因素的综合客观评价。

文献[1]利用地理信息系统技术整合地理空间数据，结合多准则决策制定（Multi-criteria Decision Making, MCDM）方法构建基于资源丰度、环境影响、经济效益等多个波浪能电站选址标准的综合评价模型，引入门控循环单元神经网络对最佳地点的波功率密度进行短期预测，从而实现最佳选址。但该方法依赖大量且高质量的数据支持，数据不完整或质量低可能影响决策准确性。文献[2]将影响光伏电站选址的关键因素作为贝叶斯网络中的节点，反映不同因素对选址结果的直接和间接影响，根据各种因素之间的概率关系，计算不同选址方案的概率分布，从而确定最佳选址方案。但该方法计算复杂度高、模型构建困难，导致电站的发电效率较低。文献[3]利用TOPSIS多准则决策方法对各种选址方

案进行综合评价，并结合地理信息系统技术，收集和分析岛屿地形等数据，通过比较分析不同选址方案的优缺点，确定最终选址方案。但多准则决策方法中准则权重和优先级的确定可能受到决策者主观因素的影响，导致决策结果存在一定程度的不确定性。文献[4]利用ArcGIS软件与层次分析法，综合考虑多种影响大型光伏电站建设的因素，对不同地势和土地类型赋予不同的光伏利用系数，得到大型光伏电站建设适宜度、光伏潜力与光伏电站选址的多因子评价模型。基于该模型得出光伏电站选址建议。但由于不同地区的地形、气候、经济条件等存在差异，因此该方法可能需要在不同区域进行适应性调整。这可能会增加模型应用的复杂性和成本。

为切实提高光伏电站的发电效率，本文结合AHP算法对区域大型光伏电站项目的选址方法展开深入研究。首先确立全面系统的选址决策体系，通过分析筛选关键指标，确保考虑所有影响因素。接着，引入正则化参数规范化处理指标，以消除量纲差异，提高可比性。随后，运用层次分析法科学计算指标权重，基于专家知识和经验实现合理量化。之后，结合相对优势度确定选址点可信度指数，直观评估各点潜力。最后，计算方案与理想方案的贴近度，排序得出最优选址方案，为项目成功

实施提供有力支持。

区域大型光伏电站项目选址方法设计

1. 区域大型光伏电站项目选址决策体系确立

选址决策体系是一个综合的、系统的决策框架，涵盖了选址过程中的各种因素，旨在确保大型光伏电站项目选址的科学性、合理性和经济性。该体系将综合考虑地质条件、光照资源、交通条件、土地利用、环境影响和政策因素等多种因素，确定选址的基本要求和限制条件。

根据项目需求、区域特点、限制条件及选址原则，结合光伏电站项目的建设目标、规模、投资预算等，以及项目对光照资源、土地条件和环境影响等方面的具体需求，参考行业报告和政策文件等资料，识别选址决策体系建立过程中的一般影响因素，基于各个因素之间的相似性与关联性，合并关联度较高的影响指标，通过运用类似工程经验，剔除对大型光伏电站项目选址极小的因素，进而得到一套和选址效果具有直接联系且相互独立的选址决策体系。

本文遵循可量化性、可测量性、系统性以及科学性的原则，从能够全面反映选址决策目标的资源条件、环境条件、交通条件、社会经济条件、支持条件以及政策条件6个角度出发，构建大型光伏电站项目选址决策体系，具体见表1。

表1 光伏电站项目选址决策体系

决策层	目标层	表示
资源条件	光照资源	c_1
	土地资源	c_2
环境条件	气候条件	c_3
	地质条件	c_4
	碳减排潜力	c_5
交通条件	道路交通	c_6
	电网接入	c_7
	物流运输成本	c_8
社会经济条件	政策环境	c_9
	市场需求	c_{10}
	当地居民态度	c_{11}
支持条件	到输电网距离	c_{12}
	人力资源	c_{13}
政策条件	政策扶持与税收优惠	c_{14}
	国家战略规划	c_{15}
	研发与创新支持	c_{16}
	并网与消纳政策	c_{17}
	碳税政策	c_{18}

资源条件是选址决策的基础，确保光伏电站能够充分利用光和土地资源进行高效发电；环境条件综合

考虑了气候和地质因素，确保电厂设备的长期稳定运行；交通条件影响电站建设和运营的效率，便捷的交通网络有助于降低物流成本，提高运营效率；社会经济条件决定了电站的经济效益和市场前景；支持条件能够降低项目成本，提高经济效益；政策条件能够提升光伏电站的技术水平和市场竞争力。

在评估光伏电站项目选址的决策指标时，需要量化各个关键要素以确保决策的准确性和科学性。对于资源条件，可以根据历史气象数据评估光照资源和土地资源的丰富程度及成本。环境条件则涵盖气候的稳定性、地质的安全性以及潜在的碳减排潜力，这些可以通过气象数据、地质勘察和生态系统模型来量化。交通条件方面，需要评估道路交通的便捷性、电网接入的可行性和物流运输成本，通过道路状况、电网运营商和物流供应商的信息来量化。社会经济条件涉及政策环境、市场需求和当地居民态度，可通过政策文件、市场调查和社区咨询来量化。支持条件中的到输电网距离和人力资源的丰富程度，可以通过实际测量和劳动力市场数据来量化。政策条件方面，包括政策扶持与税收优惠、国家战略规划、研发与创新支持、并网与消纳政策及碳税政策，这些都需要参考相关政策文件和咨询相关部门来量化其对项目的影响。通过综合量化这些指标，可以为光伏电站项目的选址提供科学、合理的决策依据。

基于大型光伏电站项目选址决策指标的选取原则，综合考虑影响选址效果的因素，并通过指标因素的分析与筛选，最终确立选址决策体系，便于计算选址方案的可信度。

2. 基于AHP算法的选址方案可信度指数计算

选址点的确定过程实际上是对多个选址方案进行比较和筛选的过程。在这个过程中，选址方案的可信度指数是衡量选址决策合理性和可靠性的重要指标，通过在地市场需求、交通状况、竞争环境和成本效益等多个维度上进行评估与验证，确定符合企业战略目标和实际运营需求的候选选址方案，进而确定最终选址点。

为降低选址指标特征向量的主观偏差，本文选用AHP算法求取各个指标的权重，结合指标熵值确定选址方案的可信度指数。首先，为消除指标间的量纲和属性差异，引入正则化参数对决策指标进行规范化处理。接着，采用AHP算法计算决策指标

的权重,通过构建判断矩阵,并使用标度法对准则层中的指标进行两两比较,量化其相对重要性,进而计算出每个指标的权重。这一过程包括计算判断矩阵的最大特征值和对应的特征向量,特征向量经归一化处理后,即可作为该层次指标的权重向量。随后,据指标自身熵值确定其对应的综合权重,并利用这些综合权重和方案比较的相对优势度,计算出备选选址点的可信度指数。最后,结合可信度指数,计算出备选方案与理想方案的相对贴近度,并据此对所有候选方案进行排序,从而确定最优的大型光伏电站项目选址方案。

为解决决策指标具有定性与定量混杂、量纲不统一及指标属性导向不一致的问题,首先引入正则化参量对各指标进行规范化处理,计算公式为

$$r_i = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\sqrt{\frac{1}{t_0}}} \quad (1)$$

式中, n 表示决策指标数量,本文取 $n=16$; x_i 表示第 i 原始指标向量; t_0 表示正则化参量。

利用标度法对每个指标进行重要度判断,由此构造判断矩阵,表达式为

$$B = (b_{ik})_{m \times m} \quad (2)$$

式中, b_{ik} 表示指标 i 对指标 k 的相对重要性; m 、 m' 分别表示矩阵的行数和列数。

进而计算矩阵中各指标的最大特征值和特征向量,公式为

$$\begin{cases} e_{\max} = B \times w_{ij} \times \lambda_i \\ e_i = \frac{e_{\max} \times c_x}{\sqrt{|A_q|}} \end{cases} \quad (3)$$

式中, λ_i 表示一致性系数; c_x 表示一致性比率; A_q 表示平移矩阵; $e_{\max}$ 、 e_i 分别表示指标的最大特征值和特征向量; w_{ij} 表示第 j 个选址方案中第 i 指标的属值。

特征向量经归一化处理后,即可作为该层次指标的权重向量,计算公式为

$$E = \frac{e_i}{\sum_{i=1}^n e_i} \quad (4)$$

由于存在多个层次的指标,因此需要计算组合权重。根据指标自身熵值确定其对应的综合权重,即

$$\omega_i = \frac{E(n-1)}{K \sum_{l=1}^N \rho_{ij}} \quad (5)$$

式中, K 表示信任函数; N 表示可选选址方案数量; ρ_{ij} 表示第 j 个选址方案中第 i 指标的比重。

通过融合各个备选点的指标信息,并利用增益匹配系数平衡各个选址方案之间的非补偿性,计算选址方案的可信度指数,公式为

$$S_p = D_r \Pi \frac{1-h_p}{\sqrt{\omega_i \times g_0}} \quad (6)$$

式中, D_r 表示两个选址方案比较的相对优势度; h_p 表示第 p 个选址方案的增益匹配系数; g_0 表示正对角加权矩阵; S_p 表示第 p 个选址方案的可信度指数。

在光伏电站项目选址决策体系基础上,采用AHP算法计算决策指标的权重,结合方案比较的相对优势度确定备选选址点的可信度指数,为最终实现光伏项目选址奠定基础。

3. 基于潜在选址点排序的光伏电站项目选址

通过选址方案的可信度指数可以确定选址方案两两比较的相对可行性,在此基础上,还需要确定所有候选选址点的优先级,从而确定最终选址点。

为更加直观的展示排序结果,本文采用计算各选址点与理想方案的相对贴近度的方式对备选方案进行排序。基于选址方案的可信度指数,构造标准化参数矩阵,表达式为

$$V = S_p \times \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1\beta} \\ g_{21} & g_{22} & \cdots & g_{2\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{\varepsilon 1} & g_{\varepsilon 2} & \cdots & g_{\varepsilon \beta} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, S_p 表示选址方案的可信度指数; $g_{\varepsilon \beta}$ 表示第 ε 个选址点中第 β 个正理想解的标量比例系数。

计算各备选方案与正理想解和负理想解的距离,即

$$\begin{cases} d^+ = \frac{V}{\eta_k} / m^* \\ d^- = \frac{\|V \times b_f\|}{X_o} \end{cases} \quad (8)$$

式中, η_k 表示变异系数; m^* 表示损失衰减因子; b_f 表示反正切函数; X_o 表示正倒数矩阵。

利用与理想方案的相对贴近度作为选址方案的综合排序值,计算公式为

$$\xi_p = \frac{\sum_{i=1}^{N'} a_i (d^+ + d^-)}{\delta_s / C_l} \quad (9)$$

式中, N' 表示同一论域中备选方案的个数; a_i 表示

各个指标方案下两两比较的益损值； δ_s 表示可调参数； C_i 表示叠加标度函数； ξ_p 表示第 p 个选址方案的综合排序值。

求得的 ξ_p 值分布区间为[0,1]，即 ξ_p 越接近于1，方案就有更大的优越性。据此，对所有候选方案进行排序，得到最优选址方案。至此，完成AHP在区域大型光伏电站项目选址中的应用分析。

实例应用分析

1. 研究背景

本文依托的实际工程项目为华能蚕庄120 MW农光互补光伏发电工程。项目位于山东省烟台市招远市蚕庄镇。该项目规划装机容量为120 MW，实际布置容量为142.381 25 MW。共安装258 875个550 Wp单晶PERC半面板双面光伏组件，计划在交流侧使用额定容量为116.4 MW的300 kW串联逆变器。每台发电机组逆变升压至35 kV，并通过35 kV集电线路接入升压站35 kV配电装置，再通过一台120 MV·A主变压器升压至220 kV。拟建升压站位于山东省烟台市招远市蚕庄邵家村附近。

基于该项目的实际概况与场址区域的建设条件，确定光伏电站的备选区域，并构成备选方案，通过选址点综合排序确定最终选址点。

2. 实验准备

通过建设前勘探，对项目所在区域的地质条件和光照资源进行分析得知，拟建场地属于丘陵及山前冲洪积平原地貌，地层岩性以中粗砂、粉质黏土和强风化花岗岩为主，不存在不良地质。光照资源情况如图1所示。

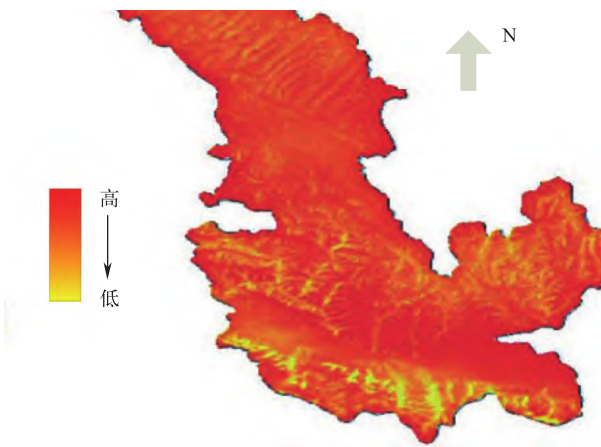


图1 目标区域光照资源情况

实验平台主要包括数据处理平台和决策分析平台。数据处理平台负责收集、组织和清理与选址相关的数据，如照明资源、土地类型、交通条件和政策环境等；决策分析平台使用AHP方法进行选址决策分析，通过构建层次结构模型、判断矩阵和计算权重，获得每个选址点的综合得分。

在基于AHP的区域大型光伏电站项目选址方法中，根据选址决策的需要，将选址问题分解为两个层次和因素。其中，一级指标设置为资源条件、环境条件、交通条件和社会经济条件等，每个一级指标进一步细分为相应的二级指标。基于工程项目拟建场地的地质和水文条件以及周边环境，选取资源因素、环境因素、交通因素、经济因素、支持因素以及政策因素作为选址评估指标，并利用AHP算法求取各个指标的综合权重，结果见表2。以表中的数据为基础数据，计算各备选选址方案的可信度指数和其与理想方案的相对贴近度，由此对各个方案进行优先级排序，确定最佳选址点。

表2 选址决策指标权重

决策层	目标层	权重值
资源条件	光照资源	0.102
	土地资源	0.256
环境条件	气候条件	1.125
	地质条件	0.369
	碳减排潜力	1.034
交通条件	道路交通	0.147
	电网接入	1.268
	物流运输成本	2.310
社会经济条件	政策环境	1.347
	市场需求	2.045
	当地居民态度	1.479
支持条件	到输电网距离	2.406
	人力资源	1.847
政策条件	政策扶持与税收优惠	1.854
	国家战略规划	0.942
	研发与创新支持	2.095
	并网与消纳政策	2.229
	碳税政策	1.647

3. 光伏电站选址结果与分析

基于以上实验准备与相关参数的设置，实验引入GIS技术（方法1）、灰色局势决策算法（方法2）作为本文方法的对比方法。分别采用3种方法对该光伏电站项目进行选址，统计基于不同方法下选址后，该地区光伏电站的等效满发小时数。为了计

算等效满发小时数，模拟光伏电站在该地区一年内的发电情况。通常使用光伏电站模拟软件PVsyst来完成。软件可以根据光伏电站的地理位置、组件类型、倾斜角和朝向等参数，结合气象数据（如太阳辐射量、温度和风速等），模拟出光伏电站的年发电量。将模拟得到的年发电量除以光伏电站的额定功率，即可得到等效满发小时数。该指标衡量的是光伏电站年均运行水平，数值越高，表明发电效率越高。实验结果如图3所示。

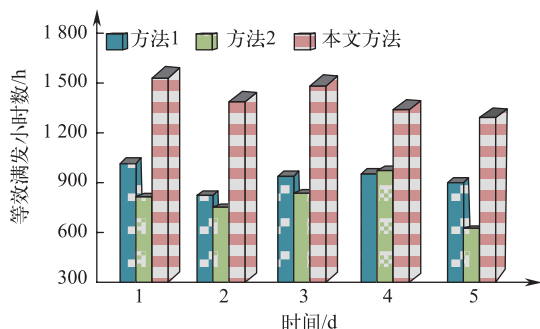


图2 光伏电站选址结果

根据图2可知，应用本文方法得到光伏电站选址结果，电站输出的等效满发小时数显著高于方法1和方法2，说明本文选择的光伏电站建设区域的条件相比于对照组方法得到的结果更加优越，从而实现更高的发电效率。

4. 对比实验与分析

为进一步验证本文方法能够在光伏电站选址中提升电站的发电效率，分析应用不同方法选址后的电站能效比。能效比越高，说明电站将太阳能转化为电能的效率越高，发电效率也就越高。对比结果如图3所示。

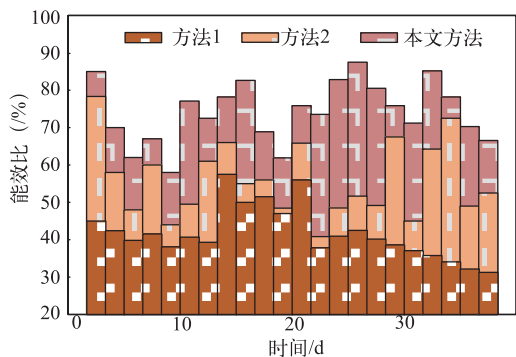


图3 基于不同方法的电站能效比对比结果

从图3中的数据可以看出，利用本文方法进行光伏电站选址，得到的电站能效比远高于方法1和方法2，说明本文方法得到的选址结果可以有效提升电站的发电效率，选址效果更加优异。

结束语

本文通过系统地整合光照资源、土地条件、交通条件和政策环境等多维因素，并进行定量评价和权重分析，最终确定最优光伏电站选址方案。AHP在区域大型光伏电站项目选址中的应用，不仅有助于促进光伏产业的健康发展，也为未来清洁能源的布局和优化提供了有益的参考。EA

(收稿日期: 2024-07-08)

参考文献

- [1] 邵萌, 刘盟楚, 陈玉静, 等. 基于GIS-MCDM-GRU的舟山市波浪能电站选址决策研究 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2023, 53 (10): 95-106.
- [2] Zhang Y, Teoh B K, Zhang L. Integrated Bayesian networks with GIS for electric vehicles charging site selection[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 26 (15): 176-177.
- [3] 邵萌, 张淑蕾, 孙金伟, 等. 基于多准则决策方法的海岛风浪互补电站选址决策研究 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2022, 52 (4): 120-129.
- [4] 王海金, 唐若笠, 周雨诗, 等. 基于ArcGIS与多因子模型的光伏电站选址评估[J]. 太阳能学报, 2023, 44 (11): 120-130.