

基于 AHP- 熵权组合赋权下的光伏发电项目风险评价研究

王 翠 陈姿汐 刘昊玮 张哨军 *

武汉工程大学 湖北武汉 430070

摘 要: 在进行光伏发电项目的风险评价过程中, 本文通过查阅大量文献并咨询多位新能源领域专家, 确定最终主要风险因素, 构建风险评价指标体系, 采用 AHP- 熵权组合赋权法分析打分数据, 预测指标风险程度, 估计风险事件发生的概率, 实现主客观结合, 并引用模糊综合评价法得出综合得分并确定风险等级, 旨在为项目进行管控前提供精准定位和确切方向, 最后以实例分析表明该评价模型能使评价结果更加客观准确。

关键词: 光伏发电; 风险评价; AHP- 熵权; 模糊综合评价法

引言

在“加快构建清洁低碳安全高效的能源体系^[1], 是我国能源革命的主攻方向”背景下, 光伏发电作为一种新能源形式, 得到了国家的高度重视。但却面临着多方面的风险, 由于单一评价方法存在一定局限性, 本文采用 AHP- 熵权组合赋权法, 将专家倾向与项目客观情况相结合, 避免了主观方法的随意性和客观方法的数据敏感性^[2], 再结合模糊综合评价法评价其风险等级^[3], 立足评估结果和管理现状, 进一步分析提出风险控制措施提供科学依据。

1 构建光伏发电项目风险评价体系

通过查阅各地区已建设的项目资料, 结合现有文献, 邀请了 10 名专家, 最终确定了 28 个风险评价指标, 构建的光伏发电项目风险评价指标体系涵盖了环境、施工等多方位的评价指标^[4], 见表 1。

2 AHP- 熵权法确定指标权重

2.1 AHP 法确定指标主观权重

(1) 构建层次结构模型: 本文选取环境风险、施工风险等 5 项作为准则层指标, 以地质灾害风险、施工进度风险等 28 项作为方案层指标^[5]。

(2) 建立判断矩阵: 采用 9 级标度法, 建立判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$, 重要性标度值见表 2。

表 1 光伏发电项目风险评价指标体系

总指标 (目标层 A)	一级指标 (准则层 B)	编号	二级指标 (方案层 C)	编号
光伏发电项目风 险综合评价	环境风险	B1	地质灾害风险	C1
			极端天气风险	C2
			水文条件风险	C3
			光照波动风险	C4
	施工风险	B2	施工进度风险	C5
			设备安装风险	C6
			高空作业安全事故风险	C7
			土方工程塌方风险	C8
	技术风险	B3	组件质量风险	C9
			逆变器故障风险	C10
			支架结构风险	C11
			电缆及连接器风险	C12
			设计缺陷风险	C13
			技术更新风险	C14
			勘察设计风险	C15
	管理风险	B4	进度管理风险	C16
			质量管理风险	C17
			成本管理风险	C18
			安全管理风险	C19
			组织协调风险	C20
			供应商违约风险	C21
			人员风险	C22
	经济风险	B5	融资风险	C23
			成本风险	C24
			上网电量风险	C25
			通货膨胀风险	C26
			电价波动风险	C27
			合同条款风险	C28

表 2 AHP 法 9 级标度法

标度 a_{ij}	含义
1	因素 i 和因素 j 同等重要
3	因素 i 比因素 j 稍重要
5	因素 i 比因素 j 较重要
7	因素 i 比因素 j 非常重要
9	因素 i 比因素 j 绝对重要
2, 4, 6, 8	表示上述判断的中间值
倒数	因素 i 和因素 j 的重要性之比为 a_{ij} , 且 $a_{ji}=1/a_{ij}$ ^[6]

(3) 计算指标的权重向量:

运用 AHP 法, 构造比较判断矩阵, 计算出每行因素的几何平均值^[7], 公式如下:

$$M = \prod_{j=1}^n a_{ij} \quad (i, j=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

$$\bar{W}_i = \sqrt[n]{M_i} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

对向量进行归一化处理:

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{k=1}^n \bar{W}_k} \quad (3)$$

(4) 一致性检验:

计算矩阵 A 的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 为:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{W_i} \quad (4)$$

计算一致性指标 CI:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \quad (5)$$

计算一致性比率 CR, 即 CI/RI. 需保证求得每个矩阵的 $CR < 0.1$, 平均随机一致性指标见表 3。

表 3 平均随机一致性指标 RI

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

2.2 熵权法确定指标客观权重

(1) 构建待评价矩阵: $X = (x_{ij})_{m \times n}$ 。

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (6)$$

(2) 标准化处理:

$$\alpha_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}\}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \quad (7)$$

(3) 平移:

本文选取平移幅度为 1。

(4) 计算第 n 个指标的比重:

$$p_{ij} = \frac{\alpha_{ij}}{\sum_{i=1}^m \alpha_{ij}} \quad (8)$$

(5) 计算熵值:

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^m (p_{ij} \ln p_{ij}) \quad (9)$$

式中: 如果 $p_{ij}=0$, 则定义 $\lim_{p_{ij} \rightarrow 0} p_{ij} \ln p_{ij} = 0$ 。

(6) 计算熵权:

$$W_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n 1 - e_j} \quad (10)$$

2.3 计算组合权重

对各级指标进行乘法合成, 公式为:

$$W^* = \frac{W_i W_j}{\sum W_i W_j} \quad (11)$$

式中: W_i 表示将最终 5 位专家权重进行几何平均得到的权重, W_j 表示二级指标熵权。

2.4 模糊综合评价法

运用本文构建的光伏发电项目风险评价指标涵盖定性指标, 具体步骤如下。

(1) 确定综合评价对象集

确定二级指标综合评价对象集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_j\}$, 其中 u_j 为评价对象的第 i 个评价因素。

(2) 确定评语集

本文将风险等级分为 5 个级别, 确定评语集 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$ 。

(3) 确定评价区间和评分集

选取评分范围中间值给各评语进行赋值, 组成的五级评分集定量划分标准见表 4。

表 4 五级评语对应区间

评语 V_j	对应区间	评分 V_j'
很低风险	$[0, 2)$	1
低风险	$[2, 4)$	3
中等风险	$[4, 6)$	5
高风险	$[6, 8)$	7
很高风险	$[8, 10)$	9

(4) 构建模糊评价矩阵

邀请 10 名专家针对每个二级指标实施模糊评价, 整理得到风险评价结果统计表并归一化, 计算出一级指标的隶属度值 d_j , 构建 5 个模糊评价矩阵。

$$d_j = \frac{\text{指标属于 } v_i \text{ 的专家数}}{10} \quad (j=1, 2, 3, 4, 5) \quad (12)$$

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{25} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{n5} \end{pmatrix} \quad (13)$$

(5) 模糊综合评价结果

采用加权平均法将隶属度值 d_j 与二级指标综合权重向量 W 进行模糊合成, 计算公式为:

$$M(\cdot, +): Y_k = \min(1, \sum_{j=1}^n w_j \cdot r_{jk}) \quad (14)$$

$$D = W \cdot R = (w_1, w_2, \dots, w_n) \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{pmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (15)$$

式中: “ $\cdot$ ” 为模糊算子, $M(\cdot, +)$ 表示先求积再求和, b_m 为第 m 个评语的隶属度。

(6) 综合得分计算

隶属度与评分相乘求和得出综合得分，公式为：

$$\text{综合得分} = \sum_{j=1}^m b_j' \cdot v_j' \quad (16)$$

$$b_j' = \frac{b_j}{\sum_{j=1}^m b_j} \quad (17)$$

式中： b_j' 为第 j 个评语归一化后的隶属度， v_j' 是第 j 个评语对应的评分值。

3 案例应用分析

3.1 案例情况

本文以张掖黑河水电 50MW_p 光伏电站项目（后文统称为 ZY 项目）为例，根据评价模型对该项目进行风险评价。本项目为甘肃黑河水电新能源开发有限责任公司筹建处一期 50MW_p 光伏发电工程。

3.2 指标权重计算

3.2.1 AHP 法确定指标主观权重

邀请 5 位新能源发电工作专家对构建的 6 个判断矩阵进行打分，采用 AHP 法确定主观权重，以专家 1 为例，构建的一级指标准则层 B 计算表见表 5。

表 5 一级指标准则层 B 计算表

A	B1	B2	B3	B4	B5	W	计算结果
B ₁	1	4	1	3	4	0.357	$\lambda_{\max}=5.336$ $CI=0.084$ $RI=1.12$ $CR=0.075<0.1$
B ₂	1/4	1	1/2	3	5	0.187	
B ₃	1	2	1	2	4	0.287	
B ₄	1/3	1/3	1/2	1	3	0.115	
B ₅	1/4	1/5	1/4	1/3	1	0.055	

将矩阵 A 进行几何平均归一化，组合成权重向量 $W=(0.357, 0.187, 0.287, 0.115, 0.055)T$ 。

方案层计算方法与准则层类同，计算二级指标权重向量并整理得到 AHP 指标权重汇总表，见表 6。

表 6 AHP 指标权重汇总表

A	二级指标 C 权重向量 W	信度检验
B ₁	(0.564, 0.263, 0.118, 0.055)	0.043<0.1
B ₂	(0.472, 0.170, 0.285, 0.073)	0.019<0.1
B ₃	(0.304, 0.108, 0.187, 0.064, 0.108, 0.042, 0.187)	0.010<0.1
B ₄	(0.217, 0.168, 0.091, 0.205, 0.104, 0.048, 0.168)	0.034<0.1
B ₅	(0.286, 0.134, 0.202, 0.065, 0.111, 0.202)	0.030<0.1

3.2.2 熵权法确定指标客观权重

邀请 5 位专家对二级指标进行打分，构建待评价矩阵，

根据上述熵权法步骤计算出二级指标熵权 $W_j=(0.054, 0.060, 0.105, 0.054, 0.094, 0.065, 0.064, 0.075, 0.060, 0.057, 0.063, 0.075, 0.060, 0.064, 0.055, 0.075, 0.126, 0.055, 0.064, 0.075, 0.060, 0.060, 0.060, 0.060, 0.048, 0.048, 0.048, 0.059)T$ 。

3.2.3 计算组合权重

采用乘法合成计算出综合权重，见表 7。

表 7 指标权重表

B	权重	C	AHP 权重	熵权	综合权重
B ₁	0.333	C1	0.487	0.029	0.083
		C2	0.234	0.033	0.045
		C3	0.149	0.057	0.050
		C4	0.077	0.029	0.013
B ₂	0.234	C5	0.493	0.051	0.147
		C6	0.159	0.035	0.033
		C7	0.226	0.035	0.046
		C8	0.093	0.040	0.022
B ₃	0.175	C9	0.244	0.033	0.047
		C10	0.095	0.031	0.017
		C11	0.122	0.034	0.025
		C12	0.077	0.040	0.018
		C13	0.134	0.033	0.026
		C14	0.119	0.035	0.024
		C15	0.127	0.030	0.022
B ₄	0.129	C16	0.240	0.040	0.057
		C17	0.140	0.068	0.056
		C18	0.091	0.030	0.016
		C19	0.212	0.035	0.043
		C20	0.145	0.040	0.034
		C21	0.054	0.033	0.010
		C22	0.064	0.033	0.012
B ₅	0.077	C23	0.253	0.033	0.049
		C24	0.166	0.033	0.032
		C25	0.076	0.026	0.012
		C26	0.229	0.026	0.035
		C27	0.046	0.026	0.007
		C28	0.096	0.032	0.018



3.3 模糊综合评价

再次邀请十名专家对二级指标进行评价,并对评价结果矩阵进行归一化,进而得到5个模糊评价矩阵。

$$R_1 = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.2 & 0.1 & 0.4 & 0.1 \\ 0 & 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.2 \\ 0.2 & 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0.2 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad R_2 = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.4 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.5 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \\ 0.1 & 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0 \end{pmatrix}$$
$$R_3 = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.2 & 0 \\ 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.2 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 \end{pmatrix} \quad R_4 = \begin{pmatrix} 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.4 & 0.4 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.1 & 0 \\ 0.6 & 0.2 & 0.2 & 0.1 & 0 \end{pmatrix}$$
$$R_5 = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0.3 & 0.6 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0 \end{pmatrix}$$

将上述二级指标综合权重与5个模糊评价矩阵进行加权平均得到一级指标的模糊综合评价结果。

$$D1 = (0.031, 0.047, 0.044, 0.052, 0.017)$$
$$D2 = (0.024, 0.098, 0.094, 0.028, 0.005)$$
$$D3 = (0.033, 0.071, 0.052, 0.023, 0.000)$$
$$D4 = (0.052, 0.098, 0.051, 0.028, 0.002)$$
$$D5 = (0.030, 0.068, 0.041, 0.014, 0.000)$$

将上述一级指标结果综合,作为ZY项目总指标模糊矩阵R,并与一级指标权重进行加权平均得到总指标模糊综合评价结果D。

$$D = (0.031, 0.069, 0.056, 0.033, 0.007)$$

计算各指标的综合得分并确定风险等级,ZY项目风险综合评价结果见表8。

表8 ZY项目风险综合评价结果

指标	综合得分	风险等级
环境风险	4.781	中等风险
施工风险	4.133	中等风险
技术风险	3.712	低风险
管理风险	3.478	低风险
经济风险	3.498	低风险
总分	4.140	中等风险

3.4 评价结果分析

由ZY项目的模糊综合评价结果可知,该项目风险等级

为中等风险,符合工程项目实际情况,该结果表明在项目建设过程中,需要进一步提高项目风险识别能力,克服风险带来的影响。由各级评估结果可以看出,一级指标中管理风险得分最低,但环境风险和施工风险均达中等风险,需重点管控。

4 结论

(1) 本文用定量的方式对光伏发电项目进行风险评价研究。其中,AHP法充分体现了专家经验,而熵权法恰好基于数据差异性修正了主观偏差,使组合赋权结果更科学。模糊综合评价法通过隶属度矩阵量化风险模糊性,解决了传统方法难以处理的不确定性问题,使评价结果更贴近实际风险分布。

(2) 以张掖黑河水电50MWp光伏电站项目为例进行实证分析,由评价结果分析可针对环境风险完善地质灾害和极端天气应急预案,针对施工风险优化施工进度,做到精准管控,但该案例项目位于西北地区,具有一定地域局限性,对于沿海或高海拔地区的适用性需进一步验证。

参考文献:

- [1] 朱文喜,陈培,陈沂,等.基于ANP的高速公路BOT项目公司投资控制有效性评价研究[J].项目管理技术,2020,18(03):37-41.
- [2] 乔庆,徐兆凯,王云亮.基于AHP-熵权法组合赋权的供水管网安全评估方法[J].城镇供水,2022,(06):50-57.
- [3] 张宝芳.H公司智能财务共享服务中心风险管理研究[J].贵阳学院学报(自然科学版),2022,17(03):28-32.
- [4] 高晶.基于模糊DEMATEL-CRITIC与改进物元可拓模型的分布式光伏发电项目风险评价研究[D].青岛理工大学,2024.
- [5] 李建周,张天文,刘杰斌,等.基于AHP层次分析法的光伏发电项目风险管理[J].中国高新科技,2018,(05):76-78.
- [6] 柯小玲,冯敏,刁凤琴.改进模糊综合评价法在煤矿区生态安全评价中的应用[J].矿业安全与环保,2016,43(06):32-36.
- [7] 杨江南,张朋飞.基于AHP-熵权法和灰色聚类综合评价的办公建筑智能化改造工程项目施工风险评价[J].项目管理技术,2024,22(03):19-26.

作者简介:王翠(2001—),女,四川泸州人,硕士研究生,主要从事工程管理研究。