

基于云模型的风力机发电因素重要性评估

张琪琪¹, 王昌友²

¹江西理工大学机电工程学院, 江西 赣州

²江西理工大学电气工程与自动化学院, 江西 赣州

收稿日期: 2024年4月21日; 录用日期: 2024年5月20日; 发布日期: 2024年5月27日

摘要

为直观细致评估风力机发电因素的重要性, 采用云模型基本算法得到描述评估结果的云图。根据影响风力机发电的因素, 确定评估指标因子, 构建一种考虑多元指标的重要性评估体系, 以此为基础, 设置涵盖气象、地理、设备三大领域的问卷调查。采用改进的层次分析法计算各评估指标权重, 结合样本数据和云模型算法得到反映重要性评估结果的云图, 通过与标准云图相比较, 得到风力机发电因素重要性评估结果。以调查风力机发电领域内专家和相关工作者为例, 验证评估模型的有效性, 结果显示: 风力机发电综合因素重要性的云特征参数为 $E_x = 3.5795$, $E_n = 0.5653$, $H_e = 0.3083$, 生成的云图反映整体评估指标较为重要, 同时将具有模糊性的评估语言可视化, 为建设风力机发电项目提供重要参考。

关键词

风力机发电, 云模型, 重要性评估, 改进层次分析法

Importance Evaluation of Wind Turbine Power Generation Factors Based on Cloud Model

Qiqi Zhang¹, Changyou Wang²

¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi

²School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi

Received: Apr. 21st, 2024; accepted: May 20th, 2024; published: May 27th, 2024

Abstract

In order to intuitively and carefully evaluate the importance of wind turbine power generation

文章引用: 张琪琪, 王昌友. 基于云模型的风力机发电因素重要性评估[J]. 传感器技术与应用, 2024, 12(3): 399-408.

DOI: 10.12677/jsta.2024.123043

factors, the cloud maps describing the evaluation results are obtained by using the basic algorithm of cloud model. According to the factors affecting wind turbine power generation, the evaluation index factors are determined, and an evaluation system considering the importance of multiple indicators is constructed, and on this basis, a questionnaire survey covering three major fields of meteorology, geography and equipment is set up. The improved analytic hierarchy process is used to calculate the weight of each evaluation index, and the cloud maps reflecting the importance evaluation result are obtained by combining the sample data and the cloud model algorithm. By comparing with the standard cloud map, the evaluation results of the importance of wind turbine generation factors are obtained. Taking the investigation of experts and related workers in the field of wind turbine power generation as an example, the effectiveness of the evaluation model is verified. The results show that the cloud characteristic parameters of the importance of comprehensive factors of wind turbine power generation are $E_x = 3.5795$, $E_n = 0.5653$, $H_e = 0.3083$, and the generated cloud image reflects that the overall evaluation indices is more important. At the same time, the fuzzy evaluation language is visualized to provide an important reference for the construction of wind turbine power generation projects.

Keywords

Wind Turbine Power Generation, Cloud Model, Importance Assessment, Improved Analytic Hierarchy Process

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着社会发展和环境问题的日益凸显, 发展新能源技术已成为现代社会不可或缺的一部分。风电产业是我国新能源领域的重要组成部分, 科学、合理评估发电因素的重要性对建设风力机发电项目有重要的参考价值。风力发电机作为一种应用越来越广泛的电力来源, 保持令人满意的发电效率至关重要[1]。目前诸多学者针对影响风力机发电效率的某一重要因素, 对其进行优化和改进, 黄琬婷等[2]对叶片开展优化设计从而提高发电效率和减小发电成本; 李强等[3]认为叶片是风能利用效率的重要因素, 分别介绍了传统和现代的气动外形优化设计方法; 张婧等[4]研究了风向角对风机发电效率的影响, 研究表明风向角变化会导致风机发电效率明显减弱; 季欣洁等[5]通过计算湍流风作用下风力机的动态响应, 分析了湍流风对风力机发电效率有着不可忽略的影响; Toshev 等[6]采用设计发电机和涡轮机的方法, 以此提高发电效率, 从而给环境和经济带来巨大收益; Li Zheng 等[7]通过研究机组之间的最佳距离, 避免了大部分机组受尾流的影响, 因此减少了相关损失; 张衡等[8]基于 CFD (Computational Fluid Dynamics)方法对风力机安装位置进行数值模拟, 获得最佳安装位置, 理论上能提高 52.1%的发电效率; 祁卓平[9]认为风速对风力发电有很大影响, 从而基于神经网络对风速进行了预测研究。上述方法大多只考虑风力机发电的单一影响因素, 仅仅只针对某一影响因素进行研究, 而风力机发电因素往往受到诸多方面影响, 单方面的因素不利于风力机发电效率的提升和发电成本的控制, 需要对影响风力机发电重要因素进行综合考虑。

因此, 通过分析影响风力机发电的因素, 本研究构建一种风力机发电因素重要性评估体系, 采用改进的层次分析法计算评估体系中的指标权重, 结合云模型理论计算得到各项评估指标的云特征参数, 观

察生成的云图得到风力机发电因素重要性评估结果, 为建设风力机发电项目提供科学的参考依据。

2. 评估指标体系的构建

评估指标的合理性直接影响到评估结果的科学性、可靠性和准确性[10]。本研究考虑风力机发电的多元影响因素, 将气象、地理、设备设置为影响风力机发电因素的三个维度, 通过相关资料和专家建议来确定维度内的指标。其中将气象因素细分为风速、风向、气温等因素, 将地理因素细分为海拔、地形、湍流等因素, 将设备因素细分为叶片形状和发电机类型等因素, 以此构建风力机发电因素重要性指标评估体系, 具体内容如表 1 所示。

Table 1. Evaluation system of importance indices of wind turbine power generation factors

表 1. 风力机发电因素重要性指标评估体系

| 维度 | 指标 | 指标内容 |
|------|-------|---------------------------------|
| 气象因素 | 风速 | 风速的大小影响叶片受力, 受力越大, 发电机发电量越多。 |
| | 风向 | 风向影响涡轮机叶轮的转速和转向, 从而影响发电机的发电量。 |
| | 气温 | 气温高, 空气密度小, 发电量低, 低温环境时发电量较高。 |
| | 天气 | 晴天气压高, 风速小, 发电效率低, 阴雨天发电效果较好。 |
| 地理因素 | 地质条件 | 地质条件影响风力机运行, 好则高效运行, 差则降低发电效率。 |
| | 海拔 | 海拔越高, 大气密度越小, 机械转动动力越小, 发电量就越少。 |
| | 地形 | 平原地区, 风力、风向比较稳定, 发电量较高。 |
| | 湍流 | 湍流的存在使得风的速度和方向变得不稳定, 降低发电效率。 |
| | 陆地 | 地形地貌会阻挡风, 陆地建的风电场发电功率要略小。 |
| | 海洋 | 在海洋上, 风比较平稳, 风力也较大, 发电功率较大。 |
| 设备因素 | 沙漠 | 沙尘和灰尘会降低风轮的旋转速度和风的强度, 降低发电效率。 |
| | 塔高 | 塔高越高, 离地面高度越高, 风速越大, 发电功率越大。 |
| | 叶轮直径 | 直径越大, 牵引面积越大, 风挡面积更大, 输出功率就越大。 |
| | 叶片形状 | 相同的旋转速度下, 长叶片产生的扭矩更大, 发电机效率更高。 |
| | 发电机类型 | 传统发电机因能量损失而降低效率, 直驱发电机效率更高。 |

3. 改进的层次分析法

3.1. 层次分析法的基本原理

层次分析法 AHP (Analytic Hierarchy Process) 是匹兹堡大学教授 T. L. Saaty 提出的一种定性分析与定量分析相结合的系统分析方法[11]。此方法被广泛应用于各种领域, 其中包括商业决策、城市规划、因素评估等。层次分析法本质是将研究的问题分解为多个因素, 并将问题的多个因素按照支配关系分组形成具有层次关系的结构, 通过层次关系构造判断矩阵, 然后求解特征向量进行归一化得到各因素的相对权重, 通过比较权重的大小判断各评估指标的相对重要性顺序。

传统的层次分析法存在一些局限性, 如主观性强、判断矩阵一致性检验困难等, 为克服这些局限性, 本研究采用了一种改进的层次分析法, 以提高风力机发电因素重要性评估的准确性和可靠性。通过引入模糊数学理论, 将定性评估转化为定量评估, 采用模糊性语言来描述评估指标的不确定性, 增加了评估的灵活性和准确性, 最后通过引入问卷评分可信度因子来确定各评价指标的权重, 避免了判断矩阵一致

性检验的困难, 同时提高了评估结果的准确性。

3.2. 优化改进的层次分析法

改进层次分析法作为一种常用的主观赋权方法, 其核心在于利用专家或领域学者的经验判断为各项指标赋予定性权重。然而, 这种方法不可避免地受到决策者主观意识的影响, 并且问卷对象的经验水平存在一定的差异, 可能导致得到的权重值与实际情况存在较大的偏差。为弥补这一缺陷, 本文在传统改进的层次分析法基础上引入了调查对象自身条件相关的系数, 以期获得更加贴近实际的指标权重, 提出了一种新的改进层次分析法——BAHP (Believe Analytic Hierarchy Process)。在该方法中, 挑选了从事风力发电领域的 n 位专家, 并为每位问卷对象分配一个自身条件系数 $T_m = a_m b_m c_m d_m$, 其中 a_m 、 b_m 、 c_m 、 d_m 分别代表第 m 位专家的职称、人才等级、学历和工作时长。同时为衡量每位专家在评估体系中的可信度, 引入重要性评分条件系数 $G_m = T_m / \sum_{m=1}^n T_x$, 其中 x 表示问卷对象的序号。在构建重要性评估体系的过程中, 充分考虑各位专家的评分, 并据此构建一个综合评价比较矩阵元素 $B_i = \sum_{m=1}^{m=n} X_{mi} G_m$, 其中 X_{mi} 为 m 位问卷者对第 i 项指标的重要性打分, 通过将问卷打分与自身条件系数相结合, 得到一个更加客观、准确的综合评估结果。最后, 利用比较矩阵元素 $B_{ij} = B_i / B_j$ 对各项指标赋予重要性比较值, 改进的 BAHP 法能够在一定程度上减少主观因素的影响, 提高评估结果的准确性和可靠性, 具体计算步骤如下:

步骤 1: 根据问卷评分结果, 构建指标比较矩阵。

$$B = [B_{ij}]_{n \times n} \quad (1)$$

步骤 2: 计算比较矩阵的重要性指数。

$$\partial_i = \sum_{j=1}^n B_j \quad (2)$$

式中: ∂_i 表示比较矩阵单行元素求和, $r_{\max} = \max(r_i)$, $r_{\min} = \min(r_i)$ 。

步骤 3: 构建重要性评估的判断矩阵。

$$C_{ij} = \begin{cases} \frac{r_i - r_j}{r_{\max} - r_{\min}} (k_m - 1) + 1, & r_i \geq r_j \\ \left[\frac{r_i - r_j}{r_{\max} - r_{\min}} (k_m - 1) + 1 \right]^{-1}, & r_i \leq r_j \end{cases} \quad (3)$$

式中, $k_m = r_{\max} / r_{\min}$ 。

步骤 4: 构建重要性评估判断矩阵的传递矩阵。

$$D_{ij} = \lg C_{ij} (i, j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (4)$$

步骤 5: 构造重要性评估判断矩阵的最优传递矩阵。

$$E_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (D_{ik} - D_{jk}) \quad (5)$$

步骤 6: 构造重要性评估的判断矩阵 C_{ij} 的拟优一致矩阵。

$$C'_{ij} = 10^{E_{ij}} \quad (6)$$

求矩阵 C'_{ij} 的最大特征值对应的特征向量, 归一化后得到评估体系中各维度和维度指标的权重 $Q_p = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)$ 。

4. 云模型

4.1. 云模型基本概念

云模型是一种基于云计算和大数据技术的数据处理与分析的模型,近年来在多个领域得到广泛的应用。云模型是将数据模拟为一种“云”形状的概念图,这种“云”由无数个数据点组成,通过云计算和大数据技术对这些实验数据进行挖掘和分析,可用于揭示数据的内在规律和特征。这种处理方式使得云模型在处理海量、复杂的数据时具有显著的优势,将其应用在风力机发电因素重要性评估中,便于分析影响风力机发电的因素。风力机的发电因素受多方面影响,如风速、风向、设备状态等。传统的数据处理方法往往难以有效地使这些影响因素转化为图形或数表,而云模型则能够解决这一问题。通过对样本数据进行挖掘和分析,云模型可以提取出其中的规律和特征,从而实现风力机发电因素重要性的准确评估。

云模型的数字特征主要包括期望(E_x)、熵(E_n)和超熵(H_e)三个部分,期望代表云滴在论域空间分布的核心;熵则反映云滴的离散程度,即云滴的模糊性;超熵则代表熵的不确定性,进一步描述云的离散和模糊程度。云模型通过其独特的数字特征,实现从定性概念到定量数值之间的转换。这种转换不仅保留了定性概念的模糊性和随机性,还使得定量数据能够反映定性概念的内在特性。云模型的数字特征不仅决定云滴在论域空间中的分布和形态,还反映数据的内在规律和特征,共同构成了云图的基本框架,使得云模型在处理数据时更加灵活、准确。

4.2. 正向云发生器构建标准云

正向云发生器是云模型中的一个重要组成部分,其主要作用是根据给定的云模型的数字特征(期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e)生成满足该特征的云滴。云滴是构成云图的基本单元,它们在论域空间中的分布和形态直接反映了云模型的数字特征。

1、正向云发生器的运算过程可以分为以下几个步骤:

1) 根据问卷评分设定的重要性评估值,得到期望 E_x 和熵 E_n ,生成满足正态分布的随机数 E'_n 。这个随机数代表了云滴在论域空间中的离散程度,即云滴的模糊性。

2) 根据给定的超熵 H_e ,生成满足正态分布的随机数 H'_e 。这个随机数代表了熵 E_n 的不确定性,进一步描述了云的离散和模糊程度。

3) 根据期望 E_x 、熵 E'_n 和超熵 H'_e ,计算云滴的确定度。

$$A = e^{-\frac{(x-E_x)^2}{2E_n^2}} \quad (7)$$

式中, x 是论域空间中的一个数值, E_x 是期望, E'_n 是熵的随机数。

2、构造标准云

风力机发电因素重要性评估等级划分为五个评分等级,其中评分最大值为 x_{\max} ,最小评分值为 x_{\min} ,标准云的云特征参数分别为:

$$\begin{cases} E_{x0} = \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2} \\ E_{x+2} = x_{\max} \\ E_{x-2} = x_{\min} \\ E_{x-1} = E_{x0} - 0.382(E_{x0} - x_{\min}) \\ E_{x+1} = E_{x0} + 0.382(x_{\max} - E_{x0}) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} E_{n-1} = E_{n+1} = \frac{0.382(x_{\max} - x_{\min})}{6} \\ E_{x0} = 0.618E_{n+1} \\ E_{n-2} = E_{n+2} = \frac{E_{n+1}}{0.618} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} H_{e-1} = H_{e+1} = \frac{H_{e0}}{0.618} \\ H_{e-2} = H_{e+2} = \frac{H_{e+1}}{0.618} \end{cases} \quad (10)$$

4.3. 逆向云发生器构建评估结果云

逆向云发生器是云模型的另一个重要组成部分,其主要作用是将一组云滴(即数据点)转换为相应的云模型数字特征,包括期望(E_x)、熵(E_n)和超熵(H_e)。该过程可以视为正向云发生器的逆操作,逆向云发生器是用于处理调查得到的实际数据,它可以从数据中提取出云模型的数字特征,从而揭示数据的内在规律和特征。

1、逆向云发生器的运算过程分为以下几个具体步骤:

- 1) 根据实验样本数据集计算期望(E_x)和方差(S^2)。
- 2) 根据所得的 E_x 计算 E_n , 计算方法如下所示。

$$E_n = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - E_x| \quad (11)$$

- 3) 根据所得的 S^2 与 E_n 计算 H_e , 计算方法如下所示。

$$H_e = \sqrt{S^2 - E_n^2} \quad (12)$$

2、构建结果云

根据问卷对象计算评估的综合结果云,计算不同问卷对象的重要性评估结果云图特征参数,计算方法如下式。

$$\begin{cases} E_{x_i} = \frac{\sum_{p=1}^s E_{x_{pi}} E_{n_{pi}}}{\sum_{p=1}^s E_{n_{pi}}} \\ E_{n_i} = \sum_{p=1}^s E_{n_{pi}} \\ H_{e_i} = \frac{\sum_{p=1}^s H_{e_{pi}} E_{ni}}{\sum_{p=1}^s E_{n_{pi}}} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $E_{x_{pi}}$ 为第 P 位问卷对象对第 i 个风力机发电因素指标的重要性评分的期望; $E_{n_{pi}}$ 为第 P 位问卷对象对第 i 个风力机发电因素指标的重要性评分的熵; $H_{e_{pi}}$ 为第 P 位问卷对象对第 i 个风力机发电因素指标的重要性评分的超熵; ω_i^* 为第 i 指标权重,计算评估结果云的特征参数如下式。

$$\left\{ \begin{array}{l} E_x = \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i^* E_{x_i}}{\sum_{i=1}^m \omega_i^*} \\ E_n = \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i^{*2} E_{n_i}}{\sum_{i=1}^m \omega_i^{*2}} \\ H_e = \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i^{*2} H_{e_i}}{\sum_{i=1}^m \omega_i^{*2}} \end{array} \right. \quad (14)$$

5. 案例分析

根据影响风力机发电因素设置相关问卷, 采用李克农特五级量表将影响风力发电因素重要程度划分为五个评分等级: 不重要(1分)、不太重要(2分)、一般(3分)、重要(4分)、非常重要(5分)。邀请风电行业内具有一定专业性和经验丰富的专家与工作人员结合实际情况比较风力发电重要性的因素, 给出专业的评分值, 经过统计分析评分数据后, 运用改进的层次分析法得到影响重要性指标的权重, 再运用云模型理论得到影响风力发电因素重要性的评估分析。

5.1. 指标权重集

根据问卷对象的业内工作年限、职称、人才层次、学历等指标设置问卷评分信度因子, 结合改进的层次分析法计算符合实际情况的重要性指标权重, 得到风力机发电因素指标的权重集, 由改进的层次分析法计算得到风力机发电因素的维度权重集, 如表 2 所示。

Table 2. Weight sets of importance indices of wind turbine power generation factors

表 2. 风力机发电因素重要性指标权重集

| 指标 | 权重 | 指标权重 | 维度 | 维度权重 | 指标在维度内权重 |
|-------|---------------|-------|------|--------------------|----------|
| 风速 | ω_{11} | 0.169 | 气象因素 | $\omega_1 = 0.46$ | 0.367 |
| 风向 | ω_{12} | 0.125 | | | 0.272 |
| 气温 | ω_{13} | 0.099 | | | 0.215 |
| 天气 | ω_{14} | 0.067 | | | 0.146 |
| 地质条件 | ω_{21} | 0.022 | 地理因素 | $\omega_2 = 0.221$ | 0.100 |
| 海拔 | ω_{22} | 0.030 | | | 0.138 |
| 地形 | ω_{23} | 0.041 | | | 0.184 |
| 湍流 | ω_{24} | 0.029 | | | 0.131 |
| 陆地 | ω_{25} | 0.020 | | | 0.09 |
| 海洋 | ω_{26} | 0.054 | | | 0.246 |
| 沙漠 | ω_{27} | 0.025 | | | 0.111 |
| 塔高 | ω_{31} | 0.073 | 设备因素 | $\omega_3 = 0.319$ | 0.230 |
| 叶轮直径 | ω_{32} | 0.086 | | | 0.270 |
| 叶片形状 | ω_{33} | 0.041 | | | 0.130 |
| 发电机类型 | ω_{34} | 0.118 | | | 0.370 |

5.2. 重要性的云图可视化

令论域为 $U = [1,5]$, 根据式(8)、(9)、(10)计算标准云的数字特征值为: 不重要(1, 0.333, 0.1)、不太重要(2, 0.333, 0.1)、一般(3, 0.333, 0.1)、重要(4, 0.333, 0.1)、非常重要(5, 0.333, 0.1)。使用逆向云算法公式(11)、(12)计算风力机发电因素重要性评估结果的云特征参数, 如表 3 所示。根据标准云的数字特征与维度指标结果云的特征参数生成云图, 如图 1、图 2 和图 3 所示。其中, 通过观察云图比较发现

Table 3. Cloud map characteristic parameter sets of power generation factors importance indices of wind turbine
表 3. 风力机发电因素重要性指标的云图特征参数集

| 指标 | 指标云参数 | | | 维度 | 维度云参数 | | |
|-------|-------|--------|--------|------|--------|--------|--------|
| | 期望 | 熵 | 超熵 | | 期望 | 熵 | 超熵 |
| 风速 | 4.4 | 0.6010 | 0.3070 | 气象因素 | 3.8897 | 0.5403 | 0.2613 |
| 风向 | 4.3 | 0.5260 | 0.2090 | | | | |
| 气温 | 2.9 | 0.2260 | 0.2210 | | | | |
| 天气 | 3.3 | 0.8771 | 0.3030 | | | | |
| 地质条件 | 2.4 | 0.6014 | 0.3100 | | | | |
| 海拔 | 2.8 | 0.8520 | 0.3440 | 地理因素 | 3.0985 | 0.6546 | 0.3954 |
| 地形 | 3.1 | 0.7017 | 0.5240 | | | | |
| 湍流 | 3.0 | 0.7518 | 0.3180 | | | | |
| 陆地 | 2.5 | 0.8771 | 0.2170 | | | | |
| 海洋 | 4.0 | 0.3759 | 0.5610 | | | | |
| 沙漠 | 2.7 | 0.7017 | 0.1920 | 设备因素 | 3.4760 | 0.5411 | 0.3171 |
| 塔高 | 2.9 | 0.4512 | 0.3440 | | | | |
| 叶轮直径 | 3.8 | 0.4010 | 0.1300 | | | | |
| 叶片形状 | 2.9 | 0.6766 | 0.2940 | | | | |
| 发电机类型 | 3.8 | 0.6516 | 0.4450 | | | | |

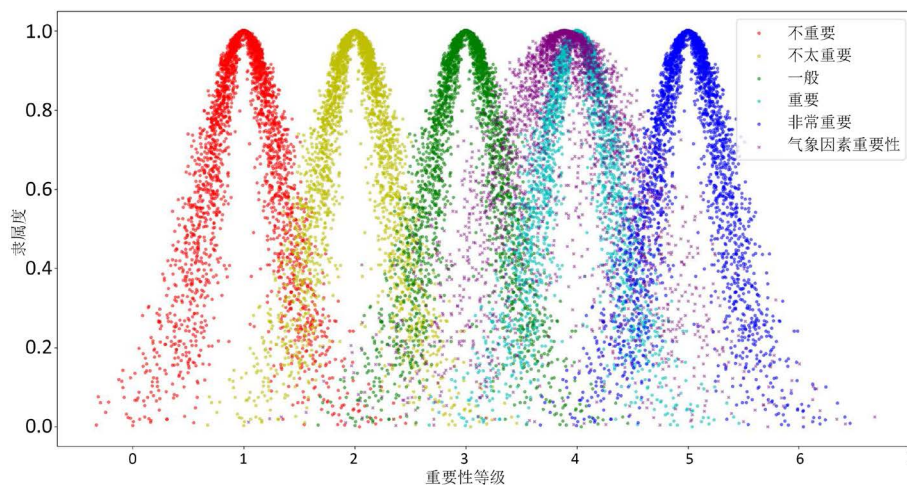


Figure 1. Meteorological factors result cloud
图 1. 气象因素结果云

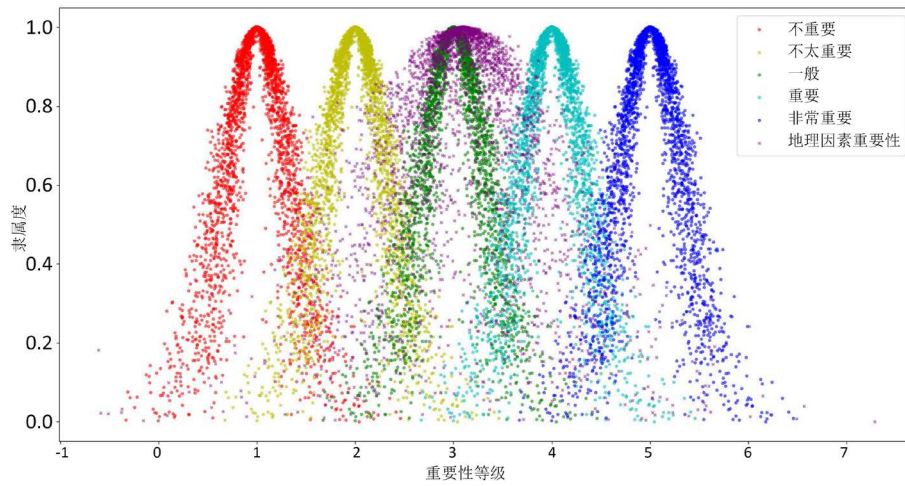


Figure 2. Geographical factors result cloud

图 2. 地理因素结果云

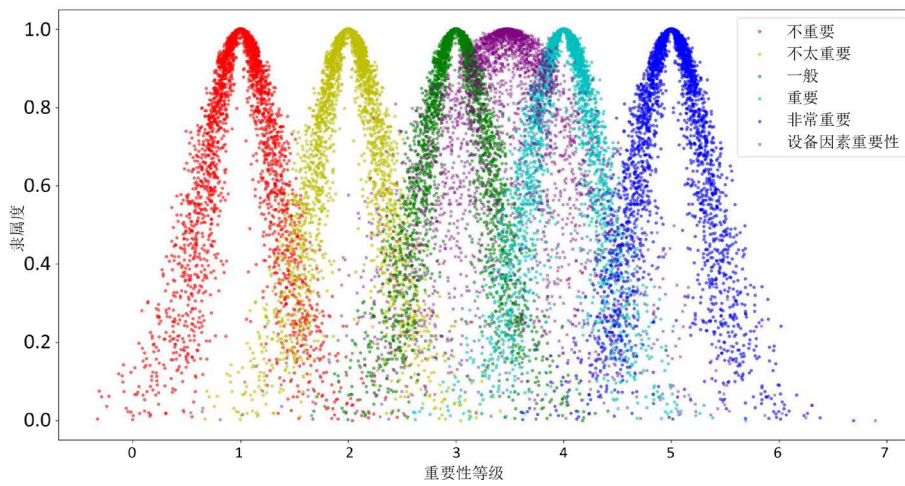


Figure 3. Device factors result cloud

图 3. 设备因素结果云

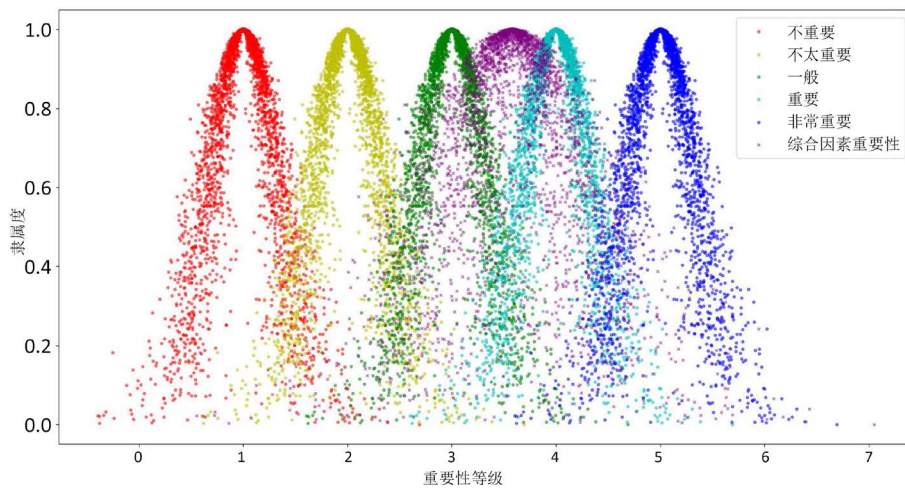


Figure 4. Comprehensive results cloud of indicators

图 4. 综合指标因素结果云

气象因素的结果云图最接近标准云的第四等级“重要”，表示气象因素是风力机发电的重要因素；其次设备因素结果云与标准云对比位于第三等级与第四等级之间，表明设备因素稍微重要；地理因素的结果云与第三级标准云几乎重合，表明地理因素评估结果为“一般”重要。通过分析维度指标的结果云特征参数，结合公式(13)、(14)得到综合评估结果云特征参数为 $E_x = 3.579$ 、 $E_n = 0.5653$ 、 $H_e = 3083$ ，生成的云图如图 4 所示，综合评估结果云图位于标准云第三等级与第四等级区间，表明本研究所选风力机发电因素的评估指标重要性介于“一般”与“重要”之间，说明本研究的指标因素对象基本符合实际要求。

6. 结论

1) 考虑多元因素的影响，构建了风力机发电因素重要性评估体系，根据问卷对象的自身经验条件，设置评估结果可信度因子，结合改进的 AHP 法确定评估维度和指标的权重，提高了评估体系中指标权重的准确性和有效性。

2) 采用云模型理论将风力机发电因素的重要性转化为云图形式描述，实现了模糊性评估语言的图形可视化，验证了云模型在重要性评估领域具有可行性，为建设风力机发电项目提供了参考。

参考文献

- [1] 焦杰, 文泽军. 基于 SCADA 数据的风力发电机发电性能指标评估[J]. 现代电力, 2020, 37(5): 539-543.
- [2] 黄婉婷, 倡国宁, 文振中, 等. 风力机叶片优化设计的研究[J]. 新型工业化, 2019, 9(8): 40-46.
- [3] 李强, 金哲岩, 杨志刚. 风力机叶片气动外形优化设计综述[J]. 机械设计, 2016, 33(7): 1-7.
- [4] 张婧, 李铭军, 曹奔, 等. 风浪夹角对浮式风机水动力及发电效率的影响[J]. 广东海洋大学学报, 2023, 43(2): 120-126.
- [5] 季欣洁, 唐友刚, 李焱, 等. 湍流风对铰接式海上风力机动力响应的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(12): 178-184.
- [6] Sherzod, T., Shaxnoza, T., Abror, S., et al. (2023) Study on a Generator and Turbine Designed for an Efficient Wind Power Plant in Low Speed Wind Currents. *E3S Web of Conferences*, **434**, Article No. 01025. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343401025>
- [7] Li, Z., Zhang, W.D., Han, R.H., et al. (2021) Analysis of Senegal Type Vertical Axis Wind Turbines Arrangement in Wind Farm. *Recent Patents on Engineering*, **15**, 246-264. <https://doi.org/10.2174/1872212113666191008121038>
- [8] 张衡, 张伟, 陈国平, 等. 不同建筑顶部风力机安装位置的数值模拟[J]. 西南科技大学学报, 2017(3): 60-65.
- [9] 祁卓平. 基于神经网络的风速预测模型研究[J]. 自动化与仪表, 2023, 38(10): 91-94.
- [10] 孙明, 杜小玉, 杨炜茹. 北京市公园绿地植物景观评价模型及其应用[J]. 北京林业大学学报, 2010(201): 163-167.
- [11] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1990.