

基于 AHP-TOPSIS 法的光伏支架 基础选型研究

周润¹, 王龙威¹, 豆红强²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;

2. 福州大学 紫金地质与矿业学院, 福建 福州 350108)

摘要: 以优化光伏电站工程支架基础设计为落脚点, 提出一种基于 AHP-TOPSIS 法的光伏支架基础选型的综合评判模型。首先从地质条件、经济效益、施工可行性和基础受力特性四个方面确定了光伏支架基础选型的9项二级指标, 再根据工程经验将每个评价指标按对基础选型的影响程度予以分级并量化, 藉此构建了光伏支架基础选型的决策矩阵, 进而结合 TOPSIS 法分析并计算得出与理想光伏支架基础选型的贴近度, 最后通过实例应用验证了 AHP-TOPSIS 综合评价模型在光伏支架基础选型中的合理性与可行性。

关键词: 光伏; 支架基础; 层次分析法 (AHP); 优劣解距离法 (TOPSIS); 贴近度

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)01-0090-07

Selection of Support Foundation for Photovoltaic Power Station Based on AHP-TOPSIS Method

ZHOU Run¹, WANG Longwei¹, DOU Hongqiang²

(1. Huadong Engineering Corporation Limited, Power China, Hangzhou, Zhejiang 311122, China;

2. Zijin school of Geology and Mining, Fuzhou University, Fujian, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Taking the optimization of the foundation design of photovoltaic power station projects as an example, a comprehensive evaluation model for the selection of photovoltaic foundation based on the AHP-TOPSIS method is proposed. Firstly, nine secondary indicators for the selection of the foundation of the PV support are determined from the four aspects of geological conditions, economic efficiency, construction feasibility and foundation stress characteristics, and then each evaluation indicator is graded and quantified according to the degree of influence on the selection of the foundation according to engineering experience. Finally, the reasonableness and feasibility of the application of the AHP-TOPSIS comprehensive evaluation model in the selection of the PV support foundation is verified by practical example.

Keywords: photovoltaic; support foundation; Analytic Hierarchy Process (AHP); Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution (TOPSIS); nearness degree

在当前“双碳”目标引领下, 太阳能光伏作为全球最经济的电力能源, 正逐步成为我国构建新型电力系统和新增电力装机的主力。而在大规模光伏发电项目建设中, 光伏支架基础数量需求庞大, 尽管支

架基础成本费用占不到光伏项目总成本的7%, 但是它却“支撑”项目约60%成本光伏组件。因此, 优化光伏电站工程支架基础设计, 选择合理的、经济的基础形式, 是节约工程投资、减少基础工程量的关

键^[1-2]。

事实上,光伏支架基础的选择涉及很多因素,在保证工程安全的前提下,经济因素、场地因素、工程的复杂程度等都影响着支架基础的选型^[3-5]。戴维斯等指出地面光伏电站支架基础的选型应根据上部支架结构形式和地质情况,结合施工条件进行合理确定^[6]。罗民等分析了山地光伏电站中常用的 4 种支架基础适用的地质条件、施工环境和设备及施工成本等方面的特点^[7]。熊祺等^[8]依托某渔光互补项目,探讨了适用于该项目特殊场地的基础和光伏支架的设计选型和优化。总体上,前述研究分析考虑的影响因素还不够全面,且未给出明确的影响因素重要性主次关系,因而在具体应用中会产生一定的局限性。

AHP-TOPSIS 法作为一种优化的决策模型,其一方面可通过层次分析法(AHP 法)确定评价指标的权重;另一方面,指标值的规范化处理和排序计算则可通过逼近理想解排序法(TOPSIS 法)进行评价,从而规避两种方法各自的缺陷,使得理论模型的选择更具实际性和客观性^[9-10]。目前已在地铁车站方案选择^[11-12]、岩爆预测^[13]、矿山保护层开采^[14]、用电状态评估^[15]乃至物联网健康系统^[16]等方面得到广泛应用,但该法在光伏支架基础选型中还缺乏相应的研究和应用。

为此,本文拟首先运用 AHP 法确定光伏支架基础选型的指标体系及其权重,而后构建决策矩阵,再结合 TOPSIS 法建立光伏支架基础选型的综合评判模型,以期光伏支架基础选型提供科学决策和技术支撑。

1 基于 AHP 法的指标权重计算

1.1 目标层与指标层的选取

AHP 法在进行决策分析时,一般从系统的决策目标出发将问题层次化、条理化,进而构建递阶层次结构,并在此基础上形成由高到低分别为目标层、准则层和指标层的一个多层次分析结构模型。目前太阳能光伏支架基础最常用的有混凝土条形基础、混凝土独立基础、混凝土灌注桩基础、混凝土预制桩基础、螺旋钢管桩基础、型钢桩基础等,因此,可将这些常用的光伏支架基础作为目标层。同时,由于影响光伏支架基础选型的因素较多,且具有较大的模糊性或者经验性,本文根据设计规范、实际工程案例以

及各支架基础方案特点,并充分综合工程师和专家的意见,选取地质条件、经济效应、施工可行性和基础受力特性四个方面的作为其指标层,如表 1 所示。

表 1 层次结构表及其符号表示

目标层 A		最优光伏支架基础选型 A		
一级评价 指标 B	地质条件 B1	经济效益 B2	施工可行性 B3	基础受力 特性 B4
二级评价 指标 C	地形地貌与基 础适用范围的 匹配程度 C1	方案造价 C3	工程对环境 的影响 C4	基础的抗拔 承载力 C8
	地层与基础适 用范围的匹配 程度 C2		工程耐腐蚀性 与项目场地腐 蚀性适用性 C5	基础的水平 承载力 C9
			施工难度及 复杂程度 C6	
			施工工期 C7	

1.2 构建判断矩阵

确定层次结构之后,需通过比较若干个因素对同一目标的影响衡量其在目标中所占比重。然而,此时比重的确定具有诸多不定因素,不易量化,且在考虑某一影响因素的多个控制因子时,决策者的主观决断直接或间接的影响了数据的可信性,甚至提出内含矛盾关系的数据。因此,为了提供可信的数据,需引入两两比较的方法建立判断矩阵。

在两个因素互相比较过程中,每一个指标的重要程度可通过定量的标度确定,如比较相对上一层某个因素的重要性时,元素 i 与元素 j 使用数量化的相对权重 a_{ij} 来描述。若待比较的元素共有 n 个,相应的判断矩阵则扩展至 $n \times n$ 矩阵,表示为 $Q = (a_{ij})_{n \times n}$ 判断矩阵;此外,采用 a_{ij} 表示两测评指标 i 与 j 的比较得分,相应的, $a_{ji} = 1/a_{ij}$ 表示指标相对的比较得分。表 2 即反映了两个测评指标相对重要程度的得分的赋值标准。采用数值大小评价重要程度,各个指标及其含义如表 2 所示。

表 2 指标重要程度分级赋值标准

数值标度	含义(均为两两因素比较)
1	具有相同重要性
3	前者比后者稍重要
5	前者比后者明显重要
7	前者比后者强烈重要
9	前者比后者极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值

进一步的,根据工程实际情况对指标进行重要度评价,基于表 1 和表 2 的层次结构与指标重要程度构造目标层 A 和指标层 B、C 的判断矩阵,分别如表 3—表 6 所示。

表 3 目标层 A 的判断矩阵

A	B1	B2	B3	B4
B1	1	2	1/3	1
B2	1/2	1	1/5	1/2
B3	3	5	1	3
B4	1	2	1/3	1

表 4 一级指标层 B1 的判断矩阵

B1	C1	C2
C1	1	1
C2	1	1

表 5 一级指标层 B3 的判断矩阵

B3	C4	C5	C6	C7
C4	1	1	2	3
C5	1	1	2	3
C6	1/2	1/2	1	1
C7	1/3	1/3	1	1

表 6 一级指标层 B4 的判断矩阵

B4	C8	C9
C8	1	1
C9	1	1

1.3 权重计算与一致性检验

建立判别矩阵 Q 之后,对于特征值与特征向量需将判断矩阵代入计算满足式 $QU = \lambda_{\max}U$,其中同一层次相应因素对于上一层次某因素相对重要性的排序权值可通过特征向量 U 经归一化后获得, $\lambda_{\max}$ 为 U 的最大特征值。将对应的归一化特征向量用 W 表示,则相应指标的单排序权重可用 W 的分量表示。

但是,对于上述构建判断矩阵的办法仍存在些许不足,该方法在减少其它因素的干扰方面能达到较优效果,能够较客观地指出一对因子影响力的异同,提供可信数据。但仍需指出的是,在综合全部比较结果过程中,其不可避免的存在一定程度的非一致性。可见,有必要进行一致性校验,定义一致性比率 CR 如式(1) 所示:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

(1)

式中: CI 为一致性指标,其可由式(2) 确定; RI 为平均随机一致性指标,其只与矩阵阶数 n 有关。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

(2)

为确定 $\lambda_{\max}$,可定义:

$$U_k = \frac{\sum_{j=1}^n a_{kj}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}}$$

(3)

此时, $U = (u_1, u_2, \cdots, u_n)^T$ 可以近似为判断矩阵 Q 对应于最大特征值的特征向量。而后借助式(4) 即可确定判断矩阵 Q 的最大特征值:

$$\lambda = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(QU)_i}{u_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} u_j}{u_i}$$

(4)

将 $CR < 0.1$ 作为判断矩阵的一致性合格的标准;不满足要求则继续修正判断矩阵 Q 。

进一步的,将满足一致性检验的判断矩阵 Q 进行权值的计算以获得权重向量 W 。首先根据表 3 并采用式(1)— 式(4) 即可确定目标层 A 的各权重向量:

$$W_A(B1, B2, B3, B4) = (0.1854, 0.0971, 0.5320, 0.1854)$$

(5)

同时,根据表 4— 表 6 计算得到地质条件 $B1$ 、施工可行性 $B3$ 的各权重向量:

$$W_{B1}(C1, C2) = (0.5, 0.5)$$

(6)

$$W_{B3}(C4, C5, C6, C7) = (0.3540, 0.3540, 0.1607, 0.1313)$$

(7)

又知: $W_{B2}(C3) = 1$ 且 $W_{B4}(C8, C9) = (0.5, 0.5)$,则各二级指标所占总权重为:

$$W = (0.0927, 0.0927, 0.0971, 0.1880, 0.1880, 0.0860, 0.0700, 0.0927, 0.0927)$$

(8)

2 决策矩阵的构建

光伏支架基础选型时由于各因素的影响评价难以得到定量值,只能做定性分析。为简化考虑,根据工程经验将光伏支架基础评价指标体系中每个评价指标按对基础选型的影响程度予以分级表示,如表 7 所示。

表 7 评价指标按对基础选型的影响程度分级

二级指标		指标等级		
C1	优	良	中	不匹配
C2	优	良	中	不匹配
C3	高	较高	中	低
C4	强	稍强	中	弱
C5	优	良	中	不符合
C6	大	较大	中	小
C7	长	较长	中	短
C8	大	较大	中	小
C9	大	较大	中	小

由表7可知,二级指标等级均分为4级,从左到右依次将其量化为“4”到“1”。但对于决策方案,若支架基础方案中含“不适用”、“不符合”的指标等级时,最终择优方案则不予考虑。同时,从表7中亦可以看出,二级指标的属性值包含多种类型,如C1、C2、C5、C8、C9为效益型指标,而C3、C4、C6以及C7则为成本型指标,由此致使不便于直接从数值大小判断方案的优劣。为此,本文采用“线性变换”的方法对上述数据进行预处理。设原始决策矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times n}$,变换后的决策矩阵记为 $B = (b_{ij})_{m \times n}$,其中 a_{ij} 、 b_{ij} 分别表示第 i 个支架基础形式的第 j 个指标)。若为效益型数据,则令 $b_{ij} = a_{ij}/a_j^{\max}$;若为成本型数据,则 $b_{ij} = 1 - a_{ij}/a_j^{\max}$ 。

3 基于 TOPSIS 法的综合评价模型

TOPSIS法是经实践验证的一种有效的多指标评价方法,该方法中正理想解和负理想解的构造为评价问题的核心,即获得各指标最优解和最劣解的途径,并将根据各个方案到理想方案的相对贴近度作为方案排序的标准,进而选出最优方案。

由前所述,光伏支架基础选型的原始决策矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times n}$ 的二级指标是多属性的,此时需经线性变换生成新的决策矩阵 $B = (b_{ij})_{m \times n}$;而后,构造加权决策矩阵 $C = (c_{ij})_{m \times n}$,并设由决策人给定各属性的权重向量为 $w = [w_1, w_2, \dots, w_n]$,此时有:

$$c_{ij} = w_j \cdot b_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

进一步的,确定正理想解 C^* 和负理想解 C^0 。设负理想解 C^0 第 j 个属性为 c_j^0 ,正理想解 C^* 的第 j 个属性值 c_j^* ,则有正理想解为:

$$c_j^* = \begin{cases} \max_i c_{ij} & j \text{ 为效益型属性值} \\ \min_i c_{ij} & j \text{ 为成本型属性值} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

负理想解为:

$$c_j^0 = \begin{cases} \min_i c_{ij} & j \text{ 为效益型属性值} \\ \max_i c_{ij} & j \text{ 为成本型属性值} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

计算各方案到正理想解与负理想解的距离。其中,备选方案到正理想解的距离为:

$$s_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^*)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

备选方案到负理想解的距离为:

$$s_i^0 = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^0)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

最终,计算各方案的排序指标值(即综合评价指数贴近度),即:

$$f_i^* = \frac{s_i^0}{s_i^0 + s_i^*}, i = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

此时,即可按贴近度由大到小确定方案的优劣次序。

需特别指出的是,依赖于 MATLAB 强大的矩阵运算能力, TOPSIS 贴近度可基于前述公式通过自编 MATLAB 程序计算。

4 光伏支架基础选型的实例应用

4.1 实例1

4.1.1 项目场地概况

某太阳能光伏电站项目位于新疆西北边陲地势较平缓开阔的沙漠戈壁荒滩,地层分布连续且稳定,由砾砂地层构成建筑物基础荷载影响深度主要范围,其结构属于中密—密实,土体压缩性较低,承载力特征值为280 kPa~350 kPa,具有较好力学性质。根据《中国地震动参数区划图》^[17](GB 18306—2015),拟建电站场址内的抗震设防烈度为Ⅶ度,超越地震动反应谱特征周期为0.40 s,概率10%的地震峰值加速度为0.15g,相应的设计荷载基本风压和雪压分别取值 $W_0 = 0.50 \text{ kN/m}^2$ 、 $S_0 = 0.45 \text{ kN/m}^2$ 。根据《建筑地基基础设计规范》^[18]及当地工程建设经验,该地为季节性冻土,冻结深度按1.40 m考虑,基础埋深取1.5 m。

然而,由于该工程的地基主要为松散堆积的砾砂,具有粘聚力较小、扰动后地基易失稳的特点。为防止建设过程造成严重的植物破坏以及更为严重的水土流失,传统的大挖大填的建设方式不再适用。因此,在光伏电站基础选型的过程中应充分考虑地基土的现状,尽可能的不破坏其结构、地表植被,规避传统的大挖大填的开挖形式,基础选型时优先增大基础的抗拔性能。

4.1.2 最优方案的确定

首先,根据场地资料、光伏支架基础特点并参考实际工程得出各方案指标评价表与原始决策矩阵表,分别如表8和表9所示。

由于原始决策矩阵的二级指标是多属性的,采用线性变换的方法实现其数据规范化,则变换后的决策矩阵如表10所示。

最后,采用 TOPSIS 法求解各方案与理想方案的

贴近度,如表 11 所示。

表 8 方案指标评价表

方案指标	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
混凝土条形基础	良	不适用	较高	较大	中	中	长	中	中
混凝土独立基础	中	不适用	较高	较大	中	中	长	中	中
混凝土灌注桩基础	优	不适用	低	小	中	中	短	中	中
预应力混凝土桩基础	不适用	良	高	小	优	中	短	中	中
螺旋钢管桩基础	优	良	较高	小	良	中	短	优	良
型钢桩基础	优	良	中	小	中	低	短	中	中

表 9 原始决策矩阵表

方案指标	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
混凝土条形基础	3	0	3	3	2	2	4	2	2
混凝土独立基础	2	0	3	3	2	2	4	2	2
混凝土灌注桩基础	4	0	1	1	2	2	1	2	2
预应力混凝土桩基础	0	3	4	1	4	2	1	2	2
螺旋钢管桩基础	4	3	3	1	3	2	1	4	3
型钢桩基础	4	3	2	1	2	1	1	2	2

表 10 线性变换后的决策矩阵

方案指标	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
混凝土条形基础	0.75	0.00	0.25	0.00	0.50	0.00	0.00	0.50	0.67
混凝土独立基础	0.50	0.00	0.25	0.00	0.50	0.00	0.00	0.50	0.67
混凝土灌注桩基础	1.00	0.00	0.75	0.67	0.50	0.00	0.75	0.50	0.67
预应力混凝土桩基础	0.00	1.00	0.00	0.67	1.00	0.00	0.75	0.50	0.67
螺旋钢管桩基础	1.00	1.00	0.25	0.67	0.75	0.00	0.75	1.00	1.00
型钢桩基础	1.00	1.00	0.50	0.67	0.50	0.50	0.75	0.50	0.67

表 11 各方案贴近度

基础选型方案	混凝土条形基础	混凝土独立基础	混凝土灌注桩基础	预应力混凝土桩基础	螺旋钢管桩基础	型钢桩基础
贴近度	0.2601	0.1970	0.5467	0.5805	0.7183	0.6414

由表 11 可知,螺旋钢管桩基础与理想方案的贴近度最高(0.7183),且不含“不适用”、“不符合”等指标等级,故可选其作为该项目的光伏支架基础。

4.2 实例 2

4.2.1 项目场地概况

某项目场地位于某山势平缓的低山丘陵地区。场地地质条件主要以出露强化风片岩和砂砾岩为主,其承载力特征值主要分布在 350 kPa~400 kPa 之间,承载力高,具有较好的力学性质,无季节性冻土层。此外,上覆有薄层可塑—硬塑粉质黏土层,基本为 100 mm~500 mm 厚,其承载力特征值较差,仅有 120 kPa~250 kPa。根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015),拟建电站场址内的抗震设

防烈度为Ⅵ度,超越概率 10% 的地震峰值加速度为 0.05g,基本风压和雪压分别取值 $W_0=0.35\text{ kN/m}^2$ 、 $S_0=0.45\text{ kN/m}^2$ 。

考虑到场地位于山地丘陵地区,地形起伏蜿蜒,坡度坡向变异较大。为控制工程造价,节约成本,光伏布置宜依山就势,顺坡而建。通过合理布置光伏组件倾角和方位角实现光伏发电效率最大化。同时,应充分考虑光伏支架基础以及各个支架立柱连接的质量要求,其不仅要保证连接的可调节性和灵活性,同时更要兼具一定的连接强度以保证光伏支架的安全性。此外,该场地多为坚硬的砂砾岩、片岩,宜采用机械化成孔的方式进行基础施工以避免人工挖孔难的难题。

4.2.2 最优方案的确定

同样的,首先,根据场地资料、光伏支架基础特点并参考实际工程得出各方案指标评价表,如表 12 所示。表 13 则为采用线性变换后的决策矩阵。

采用 TOPSIS 法求解各方案与理想方案的贴近

度,如表 14 所示。由表 14 可知,预应力混凝土桩基础与理想方案的贴近度最高(0.691),且不含“不适用”、“不符合”等指标等级,故可选其作为该项目的光伏支架基础。

表 12 各方案指标评价表

方案指标	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
混凝土条形基础	良	中	较高	较大	中	中	长	中	中
混凝土独立基础	中	不适用	较高	较大	中	中	长	中	中
混凝土灌注桩基础	优	中	低	小	中	中	短	中	中
预应力混凝土桩基础	良	良	高	小	优	中	短	良	良
螺旋钢管桩基础	良	良	较高	小	中	中	短	良	良
型钢桩基础	优	良	低	小	中	低	短	中	中

表 13 线性变换后的决策矩阵

方案指标	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
混凝土条形基础	0.75	0.67	0.25	0.00	0.50	0.00	0.00	0.67	0.67
混凝土独立基础	0.50	0.00	0.25	0.00	0.50	0.00	0.00	0.67	0.67
混凝土灌注桩基础	1.00	0.67	0.75	0.67	0.50	0.00	0.75	0.67	0.67
预应力混凝土桩基础	0.75	1.00	0.00	0.67	1.00	0.00	0.75	1.00	1.00
螺旋钢管桩基础	0.75	1.00	0.25	0.67	0.50	0.00	0.75	1.00	1.00
型钢桩基础	1.00	1.00	0.75	0.67	0.50	0.50	0.75	0.67	0.67

表 14 各方案贴近度

基础选型方案	混凝土条形基础	混凝土独立基础	混凝土灌注桩基础	预应力混凝土桩基础	螺旋钢管桩基础	型钢桩基础
贴近度	0.2739	0.1034	0.5983	0.6910	0.5987	0.6488

5 结 论

(1) 基于 AHP 法构建了光伏支架基础选型的评价指标体系,从地质条件、经济效益、施工可行性和基础受力特性四个方面确定了光伏支架基础选型的 9 个二级指标,并确定了合理的权重向量。同时,根据工程经验将每个评价指标按对基础选型的影响程度予以分级并量化,藉此构建了光伏支架基础选型的决策矩阵。

(2) 结合 TOPSIS 法分析并计算得出与理想光伏支架基础选型的贴近度,依托两个实例应用验证了 AHP-TOPSIS 综合评价模型在光伏支架基础选型中应用的合理性与可行性,本文总体上为光伏支架选型提供了一种新的系统工程决策方法。

(3) 有必要指出的是,文中对两个不同实例所用的指标权重相同是为了便于后文验算和比较,但实际上对于不同工程其指标选取是不尽相同的,且

其权重也是不同的。指标的选取和权重的确定要由工程特点、项目要求以及专家和工程负责人的意见等共同综合确定。此外,光伏支架基础的决策方案并不限于文中所给的基础形式,其均可根据实际情况予以确定。

参考文献:

[1] 安 宁,梁志华. 光伏发电的现状 & 改进[J]. 现代工业经济和信息化,2020,10(8):7-8.

[2] 刘兴佳,崔国桥,于 恺,等. 太阳能光伏柔性支架体系研究[J]. 中国新技术新产品,2020(2):79-81.

[3] Datsios Z G, Mikropoulos P N. Safe grounding system design for a photovoltaic power station[C]//8th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion. IET, 2012;1-6.

[4] Hyder F, Sudhakar K, Mamat R. Solar PV tree design: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018,82:1079-1096.

[5] 唐 湘,樊尊龙. 严寒地区季节性冻土影响下光伏支

- 架 PHC 桩基础设计的研究[J]. 太阳能, 2022(3): 87-91.
- [6] 戴维斯, 杨帆, 牛延宏. 地面光伏电站支架基础选型与设计[J]. 工程建设与设计, 2021(16): 22-24, 32.
- [7] 罗民, 翁军华, 郑海兴, 等. 山地光伏电站支架基础类型分析及选型探讨[J]. 太阳能, 2019(10): 74-76, 62.
- [8] 熊祺, 杨颖, 陶恩苗. 渔光互补光伏发电结构设计选型和优化[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(S1): 65-68.
- [9] 张毅, 刘勇, 江成玉, 等. 基于 AHP-TOPSIS 法综合评判的保护层开采选择[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(6): 65-71.
- [10] Prakash C, Barua M K. Integration of AHP-TOPSIS method for prioritizing the solutions of reverse logistics adoption to overcome its barriers under fuzzy environment[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2015, 37: 599-615.
- [11] 陈婷婷, 宋永发. AHP-TOPSIS 法在地铁车站方案选择中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(2): 326-332.
- [12] Wu Bo, Lu Ming, Huang Wei, et al. A case study on the construction optimization decision scheme of urban subway tunnel based on the TOPSIS method[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(11): 3488-3500.
- [13] 龚剑, 胡乃联, 崔翔, 等. 基于 AHP-TOPSIS 评判模型的岩爆倾向性预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1442-1448.
- [14] 张毅, 刘勇, 江成玉, 等. 基于 AHP-TOPSIS 法综合评判的保护层开采选择[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(6): 65-71.
- [15] 付志扬, 王涛, 孔令号, 等. 基于 AHP-TOPSIS 算法的重要电力客户用电状态评估[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 4095-4101.
- [16] Wang Lanjing, Ali Yasir, Nazir Shah, et al. ISA evaluation framework for security of internet of health things system using AHP-TOPSIS methods[J]. IEEE Access, 2020, 8: 152316-152332.
- [17] 中国震动参数区划图: GB 18306—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [18] 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

(上接第 7 页)

- [7] 李传林, 黄风华, 胡威, 等. 基于 Res_AttentionUnet 的高分辨率遥感影像建筑物提取方法[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(12): 2232-2243.
- [8] 李春明, 李刚, 马宁, 等. 高层建筑的快速识别方法研究[J]. 电信工程技术与标准化, 2020, 33(5): 77-80.
- [9] Cao Yinxia, Huang Xin. A deep learning method for building height estimation using high-resolution multi-view imagery over urban areas: A case study of 42 Chinese cities[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 264: 112590.
- [10] 吴浩霖. 基于无人机影像和深度学习技术的建筑物分类和统计[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2020.
- [11] 赵凤芝, 李江涛, 张国华, 等. 基于 YOLOv3 的玻璃本体特征条纹图像检测方法[J]. 信息技术, 2021(8): 21-29, 35.
- [12] 孔方方, 宋蓓蓓. 改进 YOLOv3 的全景交通监控目标检测[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(8): 20-25.
- [13] Joseph Redmon, Farhadi Ali. Yolo3: An incremental improvement[J]. arXiv e-preprint: 1804.02767, 2018.
- [14] 王志涛, 苏经宇, 马东辉, 等. 群体建筑物震害特征类比预测方法与应用[J]. 北京工业大学学报, 2008(8): 842-847.
- [15] 张敏政. 汶川地震中都江堰市的房屋震害[J]. 地震工程与工程振动, 2008(3): 1-6.
- [16] 皮凤梅, 任文杰, 陈博文, 等. 高层钢框架结构考虑 $P-\Delta$ 效应的弹性层间有害位移的简化计算[J]. 建筑结构, 2021, 51(16): 64-68.
- [17] 李静, 陈健云. 城市群体建筑物震害类比预测方法研究及应用[J]. 工程管理学报, 2011, 25(2): 152-156.
- [18] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [19] 王燕芳. 一种群体建筑易损性分析方法的优化与系统的建立[D]. 福州: 福州大学, 2016.