

文章编号: 1006-2467(2023)S1-0046-08

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.S1.26

基于反向传播神经网络的海洋工程项目 投标风险评估方法

夏禹^{1,2}, 王磊¹

(1. 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240; 2. 福氏船级社, 上海 200072)

摘要: 海洋工程行业是一个国际化的行业, 其国际化的性质决定了该行业的竞争的激烈性. 同时海洋工程项目需要大规模的资金投入, 所以在进行该类项目投标时, 公司决策人员能否对拟投标项目进行正确的风险评估后做出合理的投标决策, 对公司的长期发展起到至关重要的作用. 通过对海洋工程行业投标项目相关风险因素的分析 and 识别, 使用模糊层次分析法量化定性问题, 并通过反向传播 (Back Propagation, BP) 神经网络的高容错、高泛化能力, 建立相应项目风险评估模型. 经过验证, 该模型评估结果与实际专家评分结果相一致, 具有较高的准确性, 从而为海洋工程行业的配套企业在投标决策过程中提供了一个有效且快速的风险分析工具.

关键词: 海洋工程投标; 风险评估; 反向传播神经网络; 模糊层次分析

中图分类号: TP 183; TU 723.2; F 284

文献标志码: A

Risk Assessment Method for Marine Engineering Project Bidding Based on Back Propagation Neural Network

XIA Yu^{1,2}, WANG Lei¹

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Foresight Ship Classification, Shanghai 200072, China)

Abstract: The marine engineering industry is an internationalized sector, whose internationalization determines the intensity of competition. In the bidding process, it is crucial for company decision-makers to conduct accurate risk assessments, as this plays a vital role in the long-term development of the company. A high accuracy project risk assessment model is established after analyzing and identifying relevant risk factors in such projects based on quantifying qualitative problems using the fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) and utilizing the high fault-tolerance and generalization capabilities of the back propagation (BP) neural network. Thus, the model provides an effective and efficient risk analysis tool for supporting enterprises in the marine engineering industry in the bidding decision-making process.

Key words: marine engineering bidding; risk assessment; back propagation (BP) neural network; fuzzy analytic hierarchy process (FAHP)

收稿日期: 2023-05-14 修回日期: 2023-06-14 录用日期: 2023-07-18

基金项目: 上海市科技创新行动计划 (21DZ1201106) 资助项目

作者简介: 夏禹 (1992-), 硕士生, 研究方向为海洋工程项目管理及船舶检验技术与方法.

通信作者: 王磊, 教授, 博士生导师; E-mail: wanglei@sjtu.edu.cn.

近年来,随着欧洲能源危机,俄乌战争等因素的影响,各国对海洋的能源项目的投入不断加大^[1].在石油天然气方面,也逐步开始进入了超深水开发阶段^[2],海洋新发现的油气的储量规模远超陆地,特别是超深水油气平均储量为 3.52 亿桶当量,相当于陆上规模的 16 倍^[3].我国承接大型,复杂国际海洋工程项目(如:FPSO,FPU,FLNG 等)的数量也在逐步增加.另一方面随着绿色能源,低碳等概念的兴起,我国海上风电行业开始进入高速发展的窗口期^[4],同时也开始承接国外大型海上风电项目(如:Sea Green 项目等).随着我国未来国际海洋工程项目储备量的增加,国内外的相关配套企业的数量也在逐年增加.同时海洋工程因为其国际化的性质以及较长的项目设计和建造周期,往往会出现各种不确定的因素^[5],如近年来的俄罗斯 Arctic2 项目.在查阅海洋工程投标风险因素分析及评价的文献时,发现国内外学者对于工业、建筑类项目的风险管理^[6]等方面,结合人工智能^[7-8]、深度学习^[9]等方法,已经做了大量的研究.但是在本文所研究的海洋工程投标领域并没有太多的可参考文献.海洋工程虽然大多也采用工程总包(Engineering Procurement Construction,EPC)模式,但是和其他 EPC 项目在项目风险因素^[10]上还是有所不同的,例如海洋工程 EPC 项目涉及的不同国家承包商和供应商相比于传统工业和建筑业更加多和复杂,对政治局势的敏感性也更大.同时因为技术的复杂性,目前全球有能力和实力承接海洋工程 EPC 工程的企业也没有如其他行业之多.

以上这些问题会造成海洋工程行业在采取 EPC 模式的情况下,沟通的时间成本,政治因素的影响会比传统工业和建筑业更加庞大.同时因为有能力和实力承接类似 EPC 项目的企业不多,从而造成了被国外企业所垄断的趋势.所以在海洋工程项目投标时,如果对项目未来可能出现的风险因素缺乏认知,以及缺少对未来风险的有效规避,转移或应对措施,海洋工程大规模资金投入的行业性质会对相关企业在后疫情时代的项目实施和长远稳定的发展带来不可挽回的严重后果.同时在海洋工程的前期投标决策阶段就需要对备选投标项目的风险程度,项目体量等是否适合自身企业进行投标进行更加全面、系统的评估.

本文通过对传统国际海洋工程项目相关风险因素的识别,建立了基于模糊层次分析法和反向传播(Back Propagation,BP)神经网络的项目风险评估模型,为行业的相关配套企业在投标决策过程中有效评估项目风险提供了支持及分析方法.

2 海洋工程项目风险因素识别

为了对海洋工程项目的相关分析因素做全面的分析,在阅读了相应对 EPC 项目的成本^[11],多分包形式的施工特点^[12],采购和施工成本绩效^[13]和项目交付前全过程风险分析^[14-15]的文献后,咨询了相关领域的资深工程师、项目投标负责人后,从这些风险因素产生的根源出发,将这些风险因素划分为承包企业自身因素、项目因素、竞争对手因素、业主因素、环境因素 5 个方面,如图 1 所示.

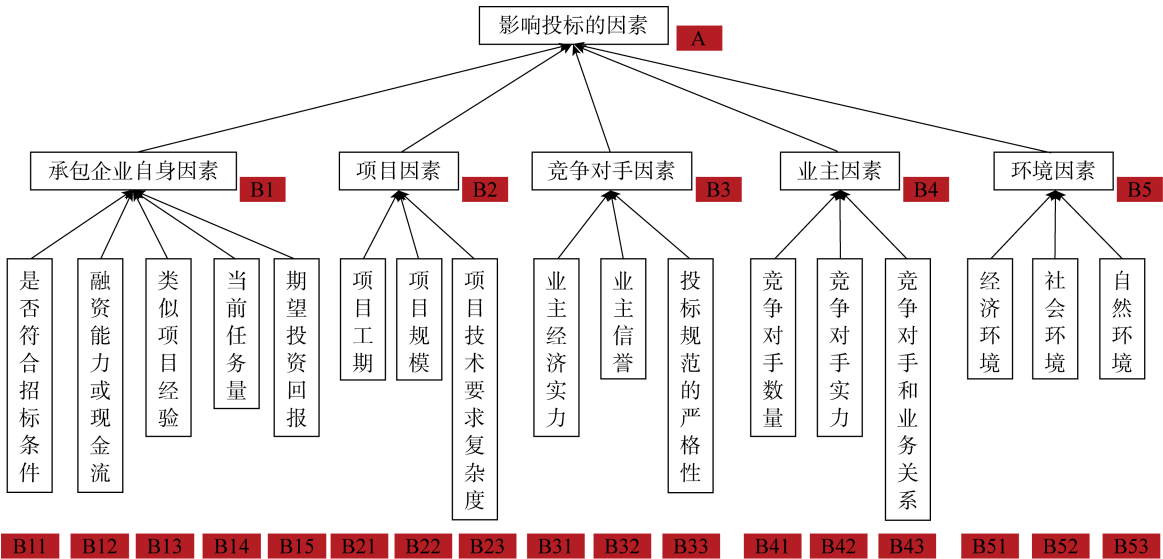


图 1 影响海洋工程投标的风险因素

Fig.1 Risk factors affecting marine engineering bidding

3 基于 BP 神经网络投标风险评估模型设计

3.1 人工神经网络

人工神经网络 (Artificial Neural Networks, ANN) 是科学家模仿生物神经网络系统建立的信息处理模型. 模型的输入可以类比为神经元的树突, 而输出可以类比为神经元的轴突, 计算则可以类比为细胞核. 其信息处理功能由大量处理单元 (神经元) 相互连接所形成的网络拓扑结构, 以及模型的输入, 输出特性 (激活函数) 所决定的, 如图 2 所示. 图中: $x_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 表示来自外部或其他神经元的输入信号; w_{ji} 为不同输入信号的相应权值, i 为神经元编号; u_i 为经线性加权, 求和后的输出; θ_i 为该神经元的阈值; O_i 为经偏差调整后的输出; $f(x_i)$ 为激活函数; Y_i 为神经元的输出, 即

$$Y_i(t) = f\left\{\left[\sum_{j=1}^n w_{ji}x_j(t - \tau_{ji})\right] - \theta_i\right\} \quad (1)$$

式中: τ_{ji} 表示输入输出间的突触延时. 为了方便起见, 假定该延时为 1, 即单位延时, 则式 (1) 中的线性求和部分可简化为

$$u_i(t) = \sum_{j=1}^n w_{ji}x_j(t) \quad (2)$$

$$O_i = u_i - \theta_i = \sum_{j=1}^n w_{ji}x_j - \theta_i \quad (3)$$

$$Y_i = f(O_i) \quad (4)$$

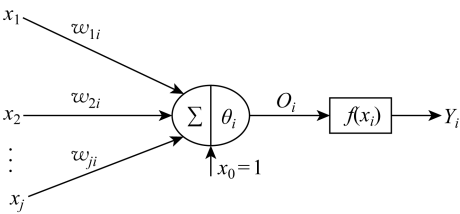


图 2 人工神经元结构模型

Fig. 2 Model of artificial neural network

同时为了方便起见, 将 θ_i 前的系数视为 -1 , 即 $x_0 = -1$, θ_i 视为 x_0 相的权值, 则可将模型的线性求和部分简化为

$$u_i = \sum_{j=0}^n w_{ji}x_j \quad (5)$$

$f(x_i)$ 可取不同的函数, 常见的激活函数有分段函数、阈值函数和 S 型函数 (Sigmoid 函数) 等.

3.2 BP 神经网络

BP 神经网络, 又被称为误差反向传播算法, 将

输出误差通过反向传播的算法, 对网络的权值和阈值进行反复的调整, 直到网络的输出误差减小到预设值或达到预先设定的学习次数.

对于 BP 神经网络, 隐含层可以使得网络由多维向低维进行映射, 但是采用越多的隐含层, BP 网络误差向后传播过程的计算就越复杂, 更加容易陷入局部最优的情况, 同时训练时间也会大幅增加^[16], 所以本文选择 3 层神经网络, 即输入层, 隐含层和输出层.

影响海洋工程投标风险因素的 BP 神经网络模型如图 3 所示.

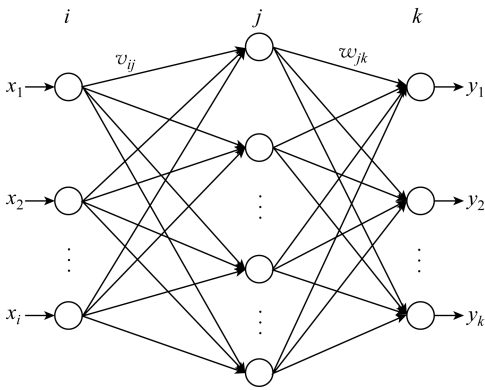


图 3 影响海洋工程投标风险因素的 BP 神经网络模型

Fig. 3 BP neural network model of risk factors affecting marine engineering bidding

BP 神经网络原理如下.

神经网络的实际输入为

$$\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_n]^T$$

实际输出为

$$\mathbf{Y} = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ \dots \ y_l]^T$$

隐含层的输出为

$$\mathbf{U} = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ \dots \ u_m]^T$$

期望输出为

$$\mathbf{D} = [d_1 \ d_2 \ d_3 \ \dots \ d_l]^T$$

输入层到隐含层的权值为

$$\mathbf{V} = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ \dots \ v_m]$$

隐含层到输出层的权值为

$$\mathbf{W} = [w_1 \ w_2 \ w_3 \ \dots \ w_l]$$

以下推导过程中对输出层有: $j = 0, 1, \dots, m$; $k = 1, 2, \dots, l$, 对于隐含层有: $i = 0, 1, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$, 假设所有神经元的激活函数都使用 Sigmoid 函数, 则:

将输出层第 k 个神经元的输出误差定义为

$$e_k = d_k - y_k \quad (6)$$

输出层总误差

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^l (d_k - y_k)^2 \quad (7)$$

输入层到隐含层的权值修正量 Δv_{ij} 和隐含层到输出层的权值修正量 Δw_{jk} 的表达式分别为

$$\Delta w_{jk} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{jk}} = -\eta \frac{\partial E}{\partial N_k} \frac{\partial N_k}{\partial w_{jk}} \quad (8)$$

$$\Delta v_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial v_{ij}} = -\eta \frac{\partial E}{\partial N_i} \frac{\partial N_i}{\partial v_{ij}} \quad (9)$$

式中:负号表示梯度下降;常数 $\eta \in (0, 1)$ 表示比例系数(学习速率); N_k 为各层神经元的输入,

$$\frac{\partial N_k}{\partial w_{jk}} = u_j \quad (10)$$

$$\frac{\partial N_k}{\partial v_{ij}} = x_i \quad (11)$$

定义输出层与隐含层的误差信号为

$$\delta_k^y = -\frac{\partial E}{\partial N_k} \quad (12)$$

$$\delta_j^u = -\frac{\partial E}{\partial N_j} \quad (13)$$

则权值调整的表达式可以改写为

$$\Delta w_{jk} = \eta \delta_k^y u_j \quad (14)$$

$$\Delta v_{ij} = \eta \delta_j^u x_i \quad (15)$$

使用式(8)和(9)的方法同时结合激活函数,可以得到:

$$\delta_k^y = (d_k - y_k) y_k (1 - y_k) \quad (16)$$

$$\delta_j^u = \left(\sum_{k=1}^l \delta_k^y w_{jk} \right) u_j (1 - u_j) \quad (17)$$

3.3 BP神经网络各参数处理

国际海洋工程也大多采用 EPC 模式,所以对于海洋工程投标风险的评估可以参考 EPC 项目的模糊数学评价思想,可以较好地处理投标风险中的主观因素,也可以将定性问题转化为定量问题进行分析,同时结合 BP 神经网络的泛化能力及容错性强等特点,进一步弱化模糊算法的主观性.本文通过将模糊评价方法和 BP 神经网络相结合,使得对于海洋工程领域的投标风险评估结果更加具有参考价值.

网络的输入:根据模糊评价法则,选定风险评价集^[17] $S = \{A, B, C, D, E\}$, 分别表示风险低、风险较低、风险一般、风险较高、风险高;相应的权重依次为 $W = [1/25 \ 3/25 \ 5/25 \ 7/25 \ 9/25]$. 通过 10

名招投标方面的专家对需要评估的项目,根据图 1 中各风险因素进行打分,从而得到这 17 个二级指标在评语集下的对应的隶属度 R ,结合个评价指标的权重,通过模糊变化公式 $B = WR^T$ 得到最后的综合权重 $\in (0, 1)$,可以直接作为 BP 神经网络的输入,即 BP 神经网络的输入节点为 17 个.

网络的输出:采用“数值法”与最大隶属度原则相结合的方式,直接把输出量定为实际中所取得的目标数据.采用层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 得出一级和二级指标层相应判断矩阵的最大特征值,同时进行一致性检验,若通过一致性检验,则得到的特征向量可以作为矩阵的权向量,若不满足一致性检验要求,则说明对判断矩阵的打分存在矛盾之处,需要对风险评估指标重新进行打分和计算,最后通过模糊计算公式,得到该项目投标的综合模糊评价结果,根据最大隶属度原则,确定该项目的投标风险等级.

隐含层节点数量的选取:目前隐含层节点数量的选择,并没有同一标准,往往是根据多次仿真实验来确定,或者根据以往学者的一些参考公式来确定,即

$$n_1 = \sqrt{n+m} + a$$

$$n_1 = \log_2 n$$

$$n_1 = \sqrt{nm} + a$$

其中: n_1 为隐含层节点数量; n 为输入层节点数量; m 为输出层节点数量; a 为 1~10 之间的某个常数.

本文采用试凑法来确定最佳的隐含层节点数量,首先可以通过以上 3 个参考公式来快速确定试凑法所要试验的隐含层边界,其次从最小的 $n_1 (n_{1_min})$ 以 5 为单位逐渐增加到最大的 $n_1 (n_{1_max})$. 比较在训练集数目相同情况下单网络收敛速度,就可以根据训练结果的误差与测试结果的误差来最终确定隐含层的数量^[18]. 通过以上方法,本文最佳的隐含层节点数为 15.

4 实例分析

本文参考海洋工程配套行业的 H 公司在 2019—2022 这 4 年内参与投标的国内外中大型海洋工程,选取其中有代表性的 43 个投标项目为样本,选取其中 40 个投标项目对 BP 神经网络进行训练,剩余的 3 个作为测试,用以验证神经网络的训练效果.

以 M 项目为例,其投标的风险因素专家评分结果如表 1 所示.

经过模糊运算后得到 BP 神经网络的 17 个输入信号如表 2 所示.

一二级指标的因素权重计算如表 3 所示.表中:CI 值为一致性标志.

经模糊运算后得到该项目的最终投标风险模糊评价结果为

$B=[0.250\ 5\ 0.347\ 4\ 0.279\ 5\ 0.107\ 7\ 0.014\ 8]$

根据最大隶属度原则,该项目的风险值为较低.对网络中的训练集和测试集都采用此方法进行运算.

利用 MATLAB 软件编程后建立 BP 神经网络的海洋工程投标风险自评估模型,经过 40 个样本的训练后,得出测试样本与实际专家评价结果对比,如表 4 所示.

表 1 M 项目投标风险因素专家评分表

Tab. 1 Expert scoring of bidding risk factors of M project

影响投标的因素集			评分				
一级指标	二级指标		低	较低	一般	较高	高
承包企业自身因素	是否符合招标条件	B11	1	5	2	1	1
	融资能力或现金流	B12	6	2	1	1	0
	类似项目经验	B13	1	4	2	2	1
	当前任务量	B14	2	5	2	1	0
	期望投资回报	B15	2	5	2	1	0
项目因素	项目工期	B21	3	3	3	1	0
	项目规模	B22	2	5	1	1	1
	项目技术要求复杂度	B23	0	1	4	3	2
业主因素	业主经济实力	B31	7	1	1	1	0
	业主信誉	B31	6	2	1	1	0
	投标规范的严格性	B33	2	6	1	1	0
竞争对手因素	竞争对手数量	B41	1	1	4	2	2
	竞争对手实力	B42	1	4	4	1	0
	竞争对手和业主关系	B43	2	5	2	1	0
环境因素	经济环境	B51	2	4	3	1	0
	社会环境	B52	2	4	3	1	0
	自然环境	B53	2	3	4	1	0

表 2 BP 神经网络投标风险评估输入数据

Tab. 2 Input data of risk assessment of BP neural network bidding

序号	权重	序号	权重
1	0.168	10	0.096
2	0.096	11	0.128
3	0.184	12	0.224
4	0.136	13	0.16
5	0.136	14	0.136
6	0.136	15	0.144
7	0.152	16	0.144
8	0.248	17	0.152
9	0.088		

表 3 影响因素权重计算表

Tab. 3 Weight calculation table for influencing factors

表类型	判断矩阵						特征向量	权重值/%	最大特征值	CI 值
	A	B1	B2	B3	B4	B5				
二级因素	B1	1					0.871	14.13		
	B2	1/3	1				0.334	5.42		
	B3	2	5	1			1.108	17.97	5.423	0.106
	B4	1	2	3	1		1.149	18.64		
	B5	3	8	2	3	1	2.702	43.84		
三级因素	B1	B11	B12	B13	B14	B15				
	B11	1					2.297	31.01		
	B12	1/4	1				0.608	8.21		
	B13	1/4	1	1			0.608	8.21	5.039	0.01
	B14	1/8	1/2	1/2	1		0.33	4.45		
	B15	2	6	6	8	1	3.565	48.12		
	B2	B21	B22	B23						
	B21	1					1.587	45.79		
	B22	1/4	1				0.437	12.60	3.009	0.005
	B23	1	3	1			1.442	41.61		
	B3	B31	B32	B33						
	B31	1					0.63	17.44		
	B32	4	1				2.289	63.37	3.009	0.005
	B33	1	1/3	1			0.693	19.19		
	B4	B41	B42	B43						
	B41	1					0.405	10.95		
	B42	3	1				1.145	30.90	3.004	0.002
	B43	5	2	1			2.154	58.16		
	B5	B51	B52	B53						
	B51	1					0.737	16.18		
	B52	1/2	1				0.397	8.72	3.006	0.003
	B53	5	8	1			3.42	75.10		

表 4 测试样本与实际专家评价结果对照表

Tab. 4 Comparison of test samples and experts' actual evaluation

对应评语集	网络评价结果			实际评价结果		
	测试项目 1	测试项目 2	测试项目 3	测试项目 1	测试项目 2	测试项目 3
低	0.212 0	0.138 8	0.134 8	0.223 2	0.151 3	0.080 0
较低	0.348 2	0.186 3	0.125 9	0.398 5	0.203 1	0.179 9
一般	0.270 8	0.309 0	0.210 5	0.292 3	0.311 4	0.185 5
较高	0.131 4	0.243 1	0.129 2	0.065 1	0.184 5	0.207 7
高	0.038 6	0.112 2	0.406 2	0.018 4	0.149 7	0.346 9

由表 4 可知,对于 3 个测试项目,网络输出的评价结果对应项目投标风险的最大隶属度分别为较低、一般、高,与实际专家评价结果对应的项目投标风险最大隶属度一致.由此可知,基于 BP 神经网络的海洋工程投标风险自评估模型具有很好的参考价值.

5 结论

在总结前人的研究基础上,本文就海洋工程行业项目投标风险相关因素进行了分析与建立了业内项目投标风险评价模型,取得了较好的效果,并得出了以下几点结论:

(1) 本文通过实际项目投标工作以及阅读相应文献,总结得出了在海洋工程 EPC 模式下,相应承包企业 5 方面的影响因素,归纳得到了相应风险因素下的 17 个评价指标.通过模糊层次分析法对这些评价指标进行量化处理从而适配 BP 神经网络,为日常时间紧张的项目投标工作提供高效的投标工具.

(2) 通过实际工作的案例评价,可以看出通过 MATLAB 现的 BP 神经网络模型可以对 EPC 模式下的海洋工程投标评价做出准确性较高的风险等级评价,从而为企业是否参加项目的投标以及认识后续项目风险提供了可靠的指导意见同时节约了相应专家评审的时间成本.

(3) 在建立自评估模型时,神经网络隐含层的激活函数使用了生物学中最为常见的 Sigmoid 函数,通过不断的优化网络的相应参数使得网络预测的准确性更加精确,模型更加高效,日后也可以尝试使用其他的激活函数继续优化该模型.同时业内每个公司的具体情况、业务范围、营运模式等都不尽相同,所以在应用本模型进行分析时,各个不同公司的专家在做自身所处公司的项目投标风险分析时,需要将自生所处公司的情况也考虑在内.

参考文献:

[1] 孙贤胜,单卫国,高振宇,等. 重塑全球能源格局的 2022[J]. 国际石油经济, 2023, 31(1): 24-30.
SUN Xiansheng, SHAN Weiguo, GAO Zhenyu, *et al.* 2022: Reshaping the global energy landscape [J]. **International Petroleum Economics**, 2023, 31 (1): 24-30.

[2] 中国石油集团经济技术研究院. 2018 年国内外油气行业发展报告[M]. 北京: 石油工业出版社, 2019.
China Petroleum Corporation Economic and Technological Research Institute. 2018 domestic and foreign

oil and gas industry development report [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019.

[3] 吴林强,张涛,徐晶晶,等. 全球海洋油气勘探开发特征及趋势分析[J]. 国际石油经济, 2019, 27(3): 29-36.
WU Linqiang, ZHANG Tao, XU Jingjing, *et al.* Characteristics and trends of global offshore oil and gas exploration and development [J]. **International Petroleum Economics**, 2019, 27 (3): 29-36.

[4] 黄海龙,胡志良,代万宝,等. 海上风电发展现状及发展趋势[J]. 能源与节能, 2020, 177(6): 51-53.
HUANG Hailong, HU Zhiliang, DAI Wanbao, *et al.* Development status and trend of offshore wind power [J]. **Energy and Energy Conservation**, 2020, 177 (6): 51-53.

[5] 谢周峰,卫文灿,孙超,等. 海外 EPC 项目的风险管理问题研究[J]. 中国市场, 2013, 717(2): 76-78.
XIE Zhoufeng, WEI Wenchao, SUN Chao, *et al.* Research on risk management of overseas EPC projects [J]. **China Market**, 2013, 717 (2): 76-78.

[6] URIL B, URIL D, GUAN B B. A time/cost/quality risk model [C]// **Proceedings of IRNOP VII Project Research Conference**. Beijing, China: Publishing House of Electronic Industry, 2006: 631-640.

[7] BOERINGER D W, WERNER D H. A comparison of particle swarm optimization and genetic algorithms for a phased array synthesis problem [C]// **Antennas & Propagation Society International Symposium**. Columbus, Ohio, USA: IEEE, 2003: 181-184.

[8] BELFARES L, KLIBI W, LO N, *et al.* Multi-objectives Tabu Search based algorithm for progressive resource allocation[J]. **European Journal of Operational Research**, 2007, 177(3): 1779-1799.

[9] ZHENG D, NG S T, KUMARASWAMY M M. Applying a genetic algorithm-based multiobjective approach for time-cost optimization[J]. **Journal of Construction Engineering & Management**, 2004, 130(2): 168-176.

[10] 陶自成,何彦舫. 模糊综合评判风险管理技术在 EPC 项目投标决策中的应用[J]. 国际经济合作, 2015, 357(9): 83-86.
TAO Zicheng, HE Yanfang. The application of fuzzy comprehensive evaluation risk management technology in EPC project bidding decision [J]. **Journal of International Economic Cooperation**, 2015, 357(9): 83-86.

[11] ZHOU X P, ZOU B H, PENG J. The causes and countermeasures of implicit cost of international EPC project [C]// **Conference Proceedings of the 7th Inter-**

national Symposium on Project Management (ISPM2019). Chongqing, China: Aussino Academic Publishing House, 2019: 1120-1125.

[12] LI W F, LING L. Cost control of sub-contracted projects based on EPC petrochemical engineering [J]. **Journal of Physics: Conference Series**, 2020, 1649 (1): 012004.

[13] KIM M H, LEE E B. A forecast model for the level of engineering maturity impact on contractor's procurement and construction costs for offshore EPC megaprojects[J]. **Energies**, 2019, 12(12): 2295-1-18.

[14] LI S, WANG Y J, ZENG Y. The standardization system of water conservancy project cost management under the EPC general contract model [J]. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 2021, 787(1): 012118.

[15] LIU H R. Analysis on cost control and management scheme of oil and gas pipeline EPC project under transnational government credit [J]. **Journal of Oil and Gas Technology**, 2019, 41(4): 76-80.

[16] 王博, 顿新春, 李智勇. 基于 BP 神经网络的水利工程投标决策模型及应用[J]. **水电能源科学**, 2013, 31(3): 131-134.

WANG Bo, DUN Xinchun, LI Zhiyong. A decision model for water conservancy engineering bidding based on BP neural network and its application [J]. **Water Resources and Power**, 2013, 31(3): 131-134.

[17] CRISTIAN C N, SHAN Y W, PHIL L, *et al.* Bridge maintenance prioritization using analytic hierarchy process and fusion tables [J]. **Automation in Construction**, 2019, 101: 99-110.

[18] 马志远. 基于序贯概率比检验和小波神经网络的齿轮箱故障诊断方法[D]. 武汉:武汉工程大学, 2016.

MA Zhiyuan. Gearbox fault diagnosis based on sequential probability ratio test and wavelet neural network [D]. Wuhan: Wuhan University of Engineering, 2016.