

# 基于 BP 神经网络及熵权灰靶法的分包商选择研究

卢 梅<sup>1</sup>, 杨佳兴<sup>1</sup>, 张喜临<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 管理学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西建工第三建设集团有限公司, 陕西 西安 710054)

**摘要:**在建筑工程分包专业化发展的趋势下,项目分包商的选择变得尤为重要,分包商选择不当会给施工带来更大的风险.同时分包商招标时也有着控制价难以确定、评价方法单一等问题.为此提出了基于 BP 神经网络和熵权灰靶法的两阶段分包商选择模型.首先提出了转换值概念,找到了承包价与分包价之间的转换关系,以 S 建筑公司的以往工程数据为基础运用 BP 神经网络预测分包招标控制价.然后建立综合指标评价体系,利用熵权法确定指标权重,再用灰靶决策确定最优分包商.最后以 S 建筑公司的实际的分包过程为例,验证了该选择模型的可行性.为分包商的选择提供了新思路.

**关键词:**分包商选择; BP 神经网络; 熵权法; 灰靶决策

中图分类号: TU74

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)03-0447-10

## Research on subcontractor selection based on BP neural network and entropy grey target method

LU Mei<sup>1</sup>, YANG Jiaying<sup>1</sup>, ZHANG Xilin<sup>2</sup>

(1. School of management, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. SCEGC No. 3 Construction Engineering Group Company Ltd, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** With the development of subcontractor specialization, the choice of subcontractor becomes more and more important. The improper choice of subcontractor will bring more risks to construction. At the same time, subcontractors also have problems such as difficulty in determining control price and single evaluation method when bidding. Therefore, a two stage subcontractor selection model based on BP neural network and entropy weight grey target method is proposed. Firstly, the conversion value algorithm is proposed, and the conversion relationship between the contract price and the subcontract price is found. Based on the previous engineering data of S Construction Company, BP neural network is used to predict the subcontract tender control price. Then the comprehensive index evaluation system is established, the index weight is determined by entropy weight method, and the optimal subcontractor is determined by grey target decision. Finally, taking the actual subcontracting process of S Construction Company as an example, the feasibility of the selection model is verified. It provides new ideas for subcontractors' choice.

**Key words:** subcontractor selection; BP neural network; entropy weight method; grey target decision

随着工程建设水平的不断发展,工程建设项目日趋复杂,施工总承包模式成为国内外建设项目中广泛采用的承包方式<sup>[1]</sup>.如今工程项目的规模日渐增大,一些综合性的项目涉及的专业越来越多,技术性也日益复杂,总承包商不可能也没有必要将全部项目内容完全独家包揽,为了更快,更好的完成项目,适应工程分包向专业化方向发展的趋势,常常分包给其他专业公司实施.这样一来,总承包商在项目施工中主要负责施工的管理,而分包商才是实际的施工者<sup>[2]</sup>.这种模式可以充分发挥专业施工企业的劳动力和技术优势,发挥总

承包企业的管理优势,合理利用资源.因此分包商成为了影响项目目标实现的重要角色.而且目前分包商也是通过招投标的方式进行选择,但是在招标的过程中没有确定控制价,分包商盲目报价的现象比较严重,另外由于施工合同通常为工程量清单报价形式的单价合同,而分包招标的工作包划分往往与清单项不一致,这就导致分包报价与主合同中相应价格很难一一对应,控制价难以确定.加之目前分包商的选择方式较为单一,所以为了保证总承包商的效益,必须制定合理的分包控制价,并选择优秀的分包商,以便促使项目各项

收稿日期: 2018-10-07

修改稿日期: 2019-05-11

基金项目: 陕西省重点科技创新团队计划基金项目(2017KCT-14)

第一作者: 卢 梅(1971—), 副教授, 研究方向为项目管理、建筑经济. E-mail: 1822831317@qq.com

通信作者: 杨佳兴(1993—), 硕士研究生, 研究方向为工程经济与管理. E-mail: 1170160569@qq.com

目标都能顺利完成。

国内外的相关研究主要有: Fong(2000)提出了通过构建多层次评价模型来评选分包商的方法,认为分包商的评价因素之间存在着层级隶属关系,上级评价因素能够直接影响下级评价因素;之后还有不少学者在选择分包商研究时采用了模糊理论的改进方法<sup>[3]</sup>。邵军义等人(2016)构建了多层次的承包商评价指标体系,将有序加权算子、灰色关联分析、以及 TOPSIS 相结合,并利用 OWA 算子对评价指标进行赋权,以此构建承包商选择模型<sup>[4]</sup>。Hamidrezai(2016)等人通过风险以及效益分析将工程项目的不同部分配给不同的分包商,以达到分包商和主承包商的最佳投资组合<sup>[5]</sup>;同时,穆静静(2009)等人运用并行工程的概念并结合模糊理论及灰色系统的方法构建了对新产品进行绿色设计时评选开发方案的评价模型,为分包商的评价方法提供参考<sup>[6]</sup>。综合来说,国内外研究学者采用了诸多方法来对分包商进行选择,都具有一定的实际意义和可行性,但是目前没有关于确定分包控制价的相关研究,分包商选择的方法也比较简单。本文采用 BP 神经网络对分包控制价进行确定,并利用熵权灰靶法对分包商进行选择,充分结合熵权法与灰靶决策在目标选择时更具客观性与合理性的优势,对实际分包商的选择具有很强的理论指导意义和实际意义。

## 1 基于 BP 神经网络的分包控制价预测

### 1.1 分包控制价及转换值 $K$

招标控制价是招标人根据有关部门颁发的计价依据和办法、设计施工图纸、工程清单等有关材料对招标工程制定的最高工程造价,其主要作用是防止投标人联合哄抬投标报价。分包控制价与此概念相同。

施工合同中价格通常是以工程量清单报价的形式体现的,属于单价合同。分包商投标报价一般为总价,不采用工程量清单计价方式,而且分包招标的工作内容划分往往与清单项不一致,因此,很难从主合同中准确提取分包工作向业主的报价,作为控制价的确定。

如图 1 所示,总包商在分包过程中划分的分包工作内容可能完全包含于相应的总包工作内容中,也有可能和总包工作内容有交叉,例如,在门窗工程的分包工程中,往往会将门窗边框的粉刷工作加入进去,而这部分工作在总包中却属于粉刷工程部分。这样一来,控制价便无法直接从总包的预算表中提取。

如果已完成工程项目的最终费用目标得以实现,那么可以说明该项目的成本情况符合现行市场情况。因此,可以认为该项目的分包价格合理,分包项目均合乎市场情况。所以我们可以用预算中该分包项目的清单价与相应的分包决算价的比值作为转换值  $K$ ,从未确定分包控制价。转换值(以下简称  $K$  值)计算方法为分包工程的分包决算单价除以该工程对应部分的承包清单单价。

分包控制价的计算公式可以表示为

$$Y = K \times X \quad (1)$$

其中,  $Y$  表示分包控制价,  $X$  表示分包工程的承包单价,  $K$  代表  $K$  值。

$K$  值的计算实际意义在于从公司以往的盈利工程中找出承包单价与分包决算单价的比值关系规律,此关系合乎该公司的盈利水平。从而在承包工程后的分包招标阶段,可以参考此比值以及承包单价,通过  $K$  值来预测分包单价,此分报价是可盈利的分包价,以此作为分包参考控制价对分包商选择具有实际意义。

### 1.2 BP 神经网络

BP 神经网络于 1986 年由 Rumelhart, McClelland 等科学家提出,是一种按照误差逆向传播算法训练的多层前馈神经网络<sup>[7]</sup>。BP 神经网络的预测主要是通过一组一组相对应的输入值和输出值建立模型,并不断调整优化该模型以达到要求的预测精确度<sup>[8]</sup>。BP 神经网络最大的优势就是具有很强的非线性映射能力,可以学习大量的繁杂数据之间的关系,并将其模拟出来。但是也存在着一定的缺点,比如:学习速度慢,容易陷入局部极小值等<sup>[9]</sup>。BP 神经网络由输入层,隐含层以及输出层构成,其中隐含层可包含多个。其结构如图 2 所示:

### 1.3 基于 BP 神经网络的分包控制价预测模型

分包价预测模型包括其输入输出模型、作用函数模型、误差计算模型以及自学习模型。

(1)确定输入、输出以及隐含层模型  
输入模型:

$$f(x) = (e^x - e^{-x}) / (e^x + e^{-x}) \quad (2)$$

工作与分包工作关系图  
between the total contracting work  
sub contract work

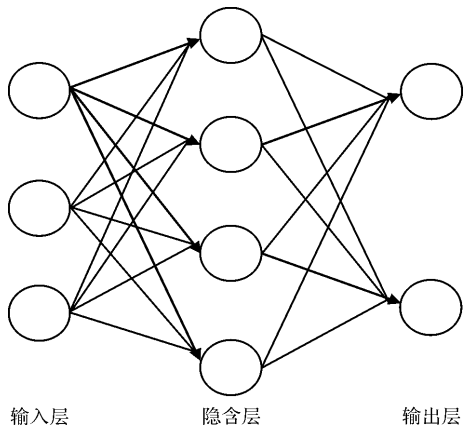


图 2 BP 神经网络结构图

Fig. 2 BP neural network structure diagram

$$O_j = f(\sum W_{ij} \times X_i - q_j) \quad (3)$$

其中:  $f$  为非线性作用函数;  $q$  为神经元阈值.

输出模型:

$$Y_k = f(\sum T_{jk} \times O_j - q_k) \quad (4)$$

(2) 确定作用函数模型

分包控制价预测模型所采用作用函数的目的

是反映下层输入对上层节点刺激反应强度.

$$f(x) = 1/(1 + e^{-x}) \quad (5)$$

(3) 确定误差计算模型

分包控制价预测模型中期望输出  $K$  值与实际输出  $K$  值之间的误差计算公式如下:

$$E_p = 1/2 \times \sum (tp_i - Op_i)^2 \quad (6)$$

其中:  $tp_i$  为期望输出值,  $Op_i$  为实际输出值.

(4) 确定自学习模型

分包控制价预测模型通过不断修正输入层、隐含层、输出层之间的连接权值以满足设定的误差要求, 从而实现学习预测的过程.

$$W_{ij}(n+1) = h \times \Phi_i \times O_j + a \times W_{ij}(n) \quad (7)$$

其中:  $h$  为学习因子,  $\Phi_i$  为输出节点  $i$  的计算误差,  $O_j$  为输出节点  $j$  的实际输出,  $a$  为动量因子.

### 1.4 基于 S 建筑公司工程项目的 $K$ 值预测

#### 1.4.1 S 建筑公司以往工程项目数据

利用 S 公司过去 10 个盈利工程的八个分部分项工程数据作为输入输出数据, 这些分部分项工程分别为: 基坑支护工程、桩基工程、主体劳务、砌体工程、抹灰工程、屋面工程、外墙保温工程以及防水工程. 数据如表 1 所示.

表 1 输入输出数据表

Tab. 1 input and output data table

工程	项目	基坑工程	桩基工程	主体工程	砌体工程	抹灰工程	屋面工程	保温工程	防水工程
工程 1	承包价	226.34	271.26	251.54	189.88	12.81	66.43	24.2	8.51
	分包价	142.13	120	230	200	14	53	18	10.5
	K 值	0.63	0.44	0.91	1.05	1.09	0.8	0.74	1.23
工程 2	承包价	228.6	280.45	268.48	208.5	14.51	68.33	25.8	10.22
	分包价	155	135	252	210	14	75	20	11
	K 值	0.68	0.48	0.94	1.01	0.96	1.1	0.78	1.07
工程 3	承包价	215.26	265.46	248.54	192.75	13.34	64.2	23.9	13.2
	分包价	148.5	122	225	205	15	63	19.5	11.5
	K 值	0.69	0.46	0.9	1.06	1.12	0.98	1.23	0.87
工程 4	承包价	177.8	187.12	321.8	193.91	17.4	65.2	29.3	7.91
	分包价	144	123.5	251	223	16	58	22	9.5
	K 值	0.81	0.66	0.78	1.15	0.92	0.89	0.75	1.2
工程 5	承包价	188.51	203.45	285.62	195.33	16.5	66.74	26.3	9.6
	分包价	135.5	104	288	186	14.5	76	32	8.5
	K 值	0.72	0.51	1.01	0.95	0.89	1.14	1.21	0.88
工程 6	承包价	196.37	205.85	275.32	196.44	13.65	67.24	24.8	9.27
	分包价	120	96.5	248	218	15	50	18	11.5
	K 值	0.61	0.47	0.9	1.11	1.1	0.75	0.73	1.25

续表 1

工程	项目	基坑工程	桩基工程	主体工程	砌体工程	抹灰工程	屋面工程	保温工程	防水工程
工程 7	承包价	170.45	248.07	212.96	183.33	13.33	63.15	16.94	15.82
	分包价	150	129	230	198	16	60	20.5	12.5
	K 值	0.88	0.52	1.08	1.08	1.2	0.95	1.21	0.79
工程 8	承包价	167.4	223.2	310.1	188	17.37	78	24.7	8.85
	分包价	154	125	245	220	16.5	58.5	21	10
	K 值	0.92	0.56	0.79	1.17	0.95	0.75	0.85	1.13
工程 9	承包价	198.63	158.73	327.05	201.09	17	67	25.86	10.33
	分包价	165	76.2	333	205	19	68.5	30	8.5
	K 值	0.83	0.48	1.02	1.02	1.11	1.02	1.16	0.82
工程 10	承包价	183.1	193.87	275.82	191.3	13.08	63.41	34	9.32
	分包价	130	95	251	200	12.7	58.5	36.7	9.1
	K 值	0.71	0.49	0.91	1.05	0.97	0.92	1.08	0.98

注:砌体工程以及桩基工程价格单位为:元/m<sup>3</sup>;其余分部分项工程价格单位为:元/m<sup>2</sup>

由于在上述分包工程中,总包商给承包商提供相应的主要材料及主要机械,所以在分包价中不包含主材费以及主要机械费,为了保证承包价与分包价的等效性与可比性,在计算相应承包价的时候也要扣除相应的主材费以及主要机械费,保留其中的辅助材料及机械费用。

#### 1.4.2 分包控制价的预测

利用 MATLAB 7.0 建立 BP 神经网络模型。

(1)样本输入值:工程 1 至工程 8 的基坑支护工程、桩基工程、主体工程、砌体工程、抹灰工程、屋面工程、外墙保温工程以及防水工程的承包价。输入层的节点数为: $n=8$ 。

样本输出值:工程 1 至工程 8 的各个分部分项工程的 K 值。输出层的节点数为: $m=8$ 。

将表 1 中的前八个工程作为训练样本,第九、十个工程作为样本检测值

(2)建立三层 BP 神经网络:输入层的节点数为 $n=8$ ,输出层的节点数为 $m=8$ ,隐层的神经元节点数根据经验公式: $L = \sqrt{n+m} + a$  来确定,取 $a=6$ ,则 $L=10$ 。

(3)选定隐含层和输出层函数分别为 tansig 和 logsig 函数,网络训练函数为 traingdx,网络性能函数为 mse。隐含层神经元节点数为 10。

(4)设定网络参数。网络迭代次数为 8 000 次,期望误差为 $10^{-7}$ ,学习速率为 0.01。

(5)将样本输入值  $P$  和样本输出值  $T$  写入程序,并经 premnmx 函数归一化处理。 $[p_1, \min p, \max p, t_1, \min t, \max t] = \text{premnmx}(P, T)$ ;

$$P = \begin{bmatrix} 226.34 & 228.6 & 215.26 & 177.8 & 188.51 & 196.37 & 170.45 & 167.4 \\ 271.26 & 280.45 & 265.46 & 187.12 & 203.45 & 205.85 & 248.07 & 223.2 \\ 251.54 & 268.48 & 248.54 & 321.8 & 285.62 & 275.32 & 212.96 & 310.1 \\ 189.88 & 208.5 & 192.75 & 193.91 & 195.33 & 196.44 & 183.33 & 188 \\ 12.81 & 14.51 & 13.34 & 17.4 & 16.5 & 13.65 & 13.33 & 17.37 \\ 66.43 & 68.33 & 64.2 & 65.2 & 66.74 & 67.24 & 63.15 & 78 \\ 24.2 & 25.8 & 23.9 & 29.3 & 26.3 & 24.8 & 16.94 & 24.7 \\ 8.51 & 10.22 & 13.2 & 7.91 & 9.6 & 9.27 & 15.82 & 8.85 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 0.63 & 0.68 & 0.69 & 0.81 & 0.72 & 0.61 & 0.88 & 0.92 \\ 0.44 & 0.48 & 0.46 & 0.66 & 0.51 & 0.47 & 0.52 & 0.56 \\ 0.91 & 0.94 & 0.9 & 0.78 & 1.01 & 0.9 & 1.08 & 0.79 \\ 1.05 & 1.01 & 1.06 & 1.15 & 0.95 & 1.11 & 1.08 & 1.17 \\ 1.09 & 0.96 & 1.12 & 0.92 & 0.89 & 1.1 & 1.2 & 0.95 \\ 0.8 & 1.1 & 0.98 & 0.89 & 1.14 & 0.75 & 0.95 & 0.75 \\ 0.74 & 0.78 & 1.23 & 0.75 & 1.21 & 0.73 & 1.21 & 0.85 \\ 1.23 & 1.07 & 0.87 & 1.2 & 0.88 & 1.25 & 0.79 & 1.13 \end{bmatrix}$$

建立网络并对样本进行训练:  $\gg [\text{net}, \text{tr}] = \text{train}(\text{net}, p_1, t_1)$ ;

TRAINLM, Epoch 0/8000, MSE 5.67429/1e-007, Gradient 201.017/1e-010

TRAINLM, Epoch 25/8000, MSE 0.0241453/1e-007, Gradient 4.76289/1e-010

TRAINLM, Epoch 75/8000, MSE 0.00106741e-007, Gradient 0.073398/1e-010

TRAINLM, Epoch90/8000, MSE1.35538e-008/1e-007, Gradient0.0089767/1e-010.

TRAINLM, Performance goal met.

由图 3 可知, 在对样本进行 90 次训练后达到目标要求。

利用工程 9 和工程 10 对模型进行检测:

$$P_1 = \begin{bmatrix} 198.63 & 183.1 \\ 158.73 & 193.87 \\ 327.05 & 275.82 \\ 201.09 & 191.3 \\ 17 & 13.08 \\ 67 & 63.41 \\ 25.86 & 34 \\ 10.33 & 9.32 \end{bmatrix}$$

得到预测值与实际值的对比如表 2.

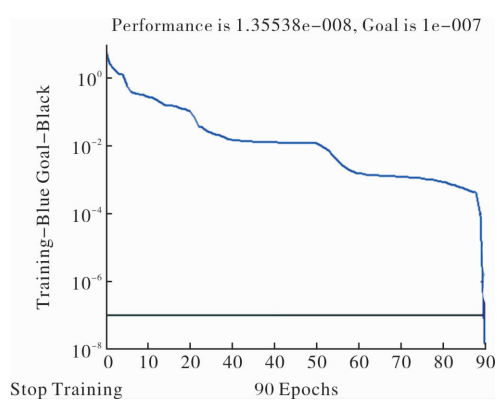


图 3 样本训练图

Fig. 3 Sample training plan

表 2 预测值与实际值差异表

Tab. 2 Difference between predicted and actual values

工程	项目	基坑工程	桩基工程	主体劳务	砌体工程	抹灰工程	屋面工程	保温工程	防水工程
工程 9	预测值	0.857	0.512 5	1.06	1.074 4	1.192 6	0.946 1	1.208 9	0.805 2
	实际值	0.83	0.48	1.02	1.02	1.11	1.02	1.16	0.82
	误差/%	3.25	6.77	3.92	5.63	7.44	7.25	4.22	1.80%
工程 10	预测值	0.797 5	0.487 7	0.963 4	0.99	0.917 7	1.018 2	1.160 8	0.917 8
	实际值	0.71	0.49	0.91	1.05	9.7	0.92	1.08	0.98
	误差/%	12.32	0.47	5.87	5.71	6.01	10.67	7.48	6.35

由上表可知, 经过模型检验, 预测值与实际值的误差在 2.45%~12.3%之间, 在可接受范围之内, 模型建立成功。

1.4.3 预测结果

已知 S 建筑公司现有一个实际工程 M 要进行分包招标, 其相应承包价数据见表 3.

表 3 欲招标工程承包价表

Tab. 3 Bidding contract price list

基坑工程	桩基工程	主体工程	砌体工程	抹灰工程	屋面工程	保温工程	防水工程
238.62	296.45	264.23	192.17	13.62	68.27	24.8	8.8

注: 砌体工程以及桩基工程价格单位为: 元/m<sup>3</sup>; 其余分部分项工程价格单位为: 元/m<sup>2</sup>.

将其数据作为输入值代入到模型中:

$$P_2 = [238.62; 296.45; 264.23; 192.17; 13.62;$$

$$68.27; 24.8; 8.8];$$

得到相应的输出 K 值见表 4.

表 4 欲招标工程 K 值表

Tab. 4 Tendering project K value table

基坑工程	桩基工程	主体工程	砌体工程	抹灰工程	屋面工程	保温工程	防水工程
0.701 5	0.465 6	0.894 3	1.106 9	0.987 8	0.757 1	0.844 2	1.221 4

以实际工程 M 中的保温工程为例, 对其分包控制价进行计算:

根据以上 K 值的预测, 保温工程的 K 值为 0.844 2, 其承包价为 24.8 元/m<sup>2</sup>, 则分包控制价 = 24.8 × 0.844 2 = 21 元/m<sup>2</sup>, 则该保温工程的分包控制价可以确定为 21 元/m<sup>2</sup>.

2 基于熵权灰靶法的分包商选择模型

2.1 熵权法

熵的概念原属于热力学范畴, 最早由申农将其引入信息理论, 并把通信过程中信息源的信号的不确定性称之为信息熵<sup>[10]</sup>. 根据信息论

的基本原理,熵则是该系统无序程度的一个度量,如果指标的信息熵越小,表示该指标提供的信息量越大,在综合评价中所起作用就应越大.因此可以通过应用熵来衡量评价指标体系中指标数据所包含的信息量,进而确定各个指标的权重.在目标的决策或者项目综合评价中,人们经常会考虑到各个指标的相对重要程度,也就是各个指标所占的权重<sup>[11]</sup>.按照熵的理论,熵值的大小只取决于数据本身.这样就使得评价体系避免了主观因素的影响,可以说熵权法是一种客观赋权方法.

## 2.2 灰靶决策

灰靶决策近年来被用于多个领域,本文采用其在决策时的一个基本思想,即在一组序列中,找出最靠近目标值得数据并建立目标参考序列.各个序列与目标参考序列构成灰靶,参考序列为

靶心,各个数据序列与靶心的距离定义为靶心距.根据靶心距来对各个方案进行必选,最终确定最优方案.定义最优序列为正靶心,最劣序列为负靶心,综合考虑各个序列的正负靶心距,在空间分析的基础上确定综合靶心距.结合熵权法确定的权重用综合靶心距确定最优方案更加准确、客观.

## 2.3 评价指标体系的建立

影响分包商选择的因素很多,其中包括在主观因素,客观因素;可见因素,不可见因素等等.为使评价指标选取更加准确,须遵循全面性原则、科学性原则、可操作性原则、灵活性、定量与定性相结合原则等<sup>[12]</sup>.

通过分析汇总知网,万方等数据库中大量关于分包商评价选择研究的文献,确定的参考选用的分包商评价指标如下表<sup>[13-20]</sup>:

表5 分包商评价指标汇总表  
Tab.5 Subcontractor's evaluation index summary sheet

一级指标	二级指标	参考文献
控制管理能力 A	报价 A <sub>1</sub>	13, 15, 17~19, 20, 22, 25~28, 30
	质量管理水平 A <sub>2</sub>	14, 15, 17, 19~21, 23, 24, 28, 29
	安全管理水平 A <sub>3</sub>	15~19, 21, 22, 23, 24, 24, 29
	进度管理水平 A <sub>4</sub>	14, 15, 17~21, 25, 26, 28, 30
专业技术能力 B	机械资源水平 B <sub>1</sub>	15, 17, 19~21, 23, 27, 28, 30
	人力资源水平 B <sub>2</sub>	14, 16, 18, 20, 21, 23, 24, 28, 29
	技术人员水平 B <sub>3</sub>	13~, 15, 17~21, 23, 24, 27.28, 29
企业信誉及经验 C	承担类似工程数量 C <sub>1</sub>	13, 15, 17~21, 23~25, 28, 29
	中标率 C <sub>2</sub>	14, 17, 19, 20, 23, 25, 28
	合同履约率 C <sub>3</sub>	13, 14, 16, 18, 23, 24, 29
财务能力 D	资产负债率 D <sub>1</sub>	16, 17, 18, 23, 24, 30
	工程利润率 D <sub>2</sub>	14, 17, 22, 25, 27, 28, 30
	流动比率 D <sub>3</sub>	17, 22, 23, 26, 28, 29

## 2.4 评价选择模型的建立

(1)构建  $n \times m$  的原始数据矩阵  $A$ , 其中  $n$  为样本单位,  $m$  为评价指标.

$$A = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix}$$

(2)原始数据矩阵  $A$  的标准化, 得到  $R = (r_{ij}) n \times m$ .

其中越大越好的盈利型指标的标准化公式如下:

$$r_{ij} = (x_{ij} - \min\{x_{ij}\}) / (\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}) \quad (8)$$

对于越小越好的成本型指标的标准化公式如下:

$$r_{ij} = (\max\{x_{ij}\} - x_{ij}) / (\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}) \quad (9)$$

(3)计算各个评价指标的熵值

在有  $m$  个指标,  $n$  个被评价对象的评价矩阵

中,第  $j$  个指标熵的公式为

$$H_j = -k \sum_{i=1}^n f_{ij} \times \ln f_{ij}; j = 1, 2, \dots, m \tag{10}$$

式中,  $k$  为待定常数,在数值上表示为

$$k = \frac{1}{\ln n}, f_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^n x_{ij} \tag{11}$$

当  $f_{ij}=0$  时,令  $f_{ij} \times \ln f_{ij} = 0$ .

(4)确定指标权重

计算出第  $j$  个指标的熵值之后,通过以下公式来确定第  $j$  个指标的权重.

$$\omega_j = (1 - H_j) / (m - \sum_{j=1}^m H_j), j = 1, 2, \dots, m \tag{12}$$

(5)、评价决策最优方案

首先将权重  $\omega_j$  与目标矩阵  $R = (r_{ij}) n \times m$  中相对应的各类指标分别相乘,得到加权规范化矩阵  $V$ ;

然后确定正负靶心:

根据“大中取最大”的原则确定正靶心.

$$V_{\max} = \{ \max v_{ij} \mid j \in J \mid i = 1, 2, \dots, n \} \tag{13}$$

根据“小中取最小”的原则确定负靶心.

$$V_{\min} = \{ \min v_{ij} \mid j \in J \mid i = 1, 2, \dots, n \} \tag{14}$$

其次确定正负靶距:

正靶距:

$$S^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (v_{ij} - \max v_j)^2} \quad i = 1, 2, \dots, n; \tag{15}$$

( $\omega_j$  为该指标权重)

负靶距:

$$S^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (v_{ij} - \min v_j)^2} \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{16}$$

最后确定综合靶距:

由于每个方案的序列向量都位于正负靶心之间,且任一方案的正负靶心距都小于或等于正靶心到负靶心的距离,正负靶心距离  $S_0$  计算公式如下.

$$S_0 = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (\max v_j - \min v_j)^2} \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{17}$$

因为方案点与正负靶心在空间可围成一个三角形或共线.因此,可用方案点与正靶心之间的距离  $S^+$  在正负靶心连线上的投影  $S$  的大小来确定为综合靶心距  $S^*$ .

由余弦定理可知:

$$(S^+)^2 + (S_0)^2 - 2S^+ S_0 \cos \theta = (S^-)^2 \tag{18}$$

所以投影  $S$  计算公式如下.

$$S = S^+ \cos \theta = [(S^+)^2 + (S_0)^2 - (S^-)^2] / 2S_0 \tag{19}$$

但是在特殊情况下会出现两点在正负靶心间连线上的情况,此时二者的投影相同,仅根据投影并不能准确的评价二者的优劣情况,因此还需考虑该点到正靶心的距离.综合考虑点到正负靶心间连线上的投影  $S$  和到正靶心的距离  $S^+$  从而确定综合靶距  $S^*$ , 计算公式如下:

$$S^* = S / (S + S^+) \tag{20}$$

根据计算出的综合靶距,  $S^*$  值最小的为最优分包商,并选择该分包商中标.

2.5 算例分析

上述确定控制价后,进行分包商的初次选择,对投标价高于控制价的予以淘汰.投标的 8 家分包商报价如下表:

表 6 各分包商投标报价表

Tab. 6 Subcontractors quotation sheet

分包商	分包商 A	分包商 B	分包商 C	分包商 D	分包商 E	分包商 F	分包商 G	分包商 H
报价/元 $\cdot$ m <sup>-2</sup>	21	20	20	23	18	22	22	25 元/m <sup>2</sup>

已知该保温工程的分包控制价为 21 元/m<sup>2</sup>,所以仅有分包商 A、B、C、E 四家报价合格,进入第二阶段的评选.

根据上述建立的指标体系,从控制管理能力,专业技术能力,企业信誉及经验,财务能力 4 个一

级指标及下属的 13 个二级指标对分包商进行综合评定.定量指标直接进行计算,定性指标由评标专家对其进行打分,专家打分采取十分制.

4 家分包商经专家评定后的打分结果如下表:

表 7 评价指标打分表  
Tab. 7 Scoring system for evaluation indicators

一级指标	二级指标	各分包商指标评价得分			
		分包商 A	分包商 B	分包商 C	分包商 E
控制管理能力	A <sub>1</sub>	21 元/m <sup>2</sup>	20 元/m <sup>2</sup>	20 元/m <sup>2</sup>	18 元/m <sup>2</sup>
	A <sub>2</sub>	9	8	8	7
	A <sub>3</sub>	8	8.5	7	9
	A <sub>4</sub>	7.5	8	8.5	8
专业技术能力	B <sub>1</sub>	8.5	9	8	8.5
	B <sub>2</sub>	108	96	102	89
	B <sub>3</sub>	82%	80%	85%	78%
企业信誉及经验	C <sub>1</sub>	8	6	7	8
	C <sub>2</sub>	8%	9.3%	10%	7%
	C <sub>3</sub>	96%	88%	92%	85%
财务能力	D <sub>1</sub>	9	8.5	9	8
	D <sub>2</sub>	6.9%	6.5%	7%	6.6%
	D <sub>3</sub>	8.5	8	8.5	8.5

(1)构建原始评价矩阵 A

$$A = \begin{bmatrix} 21 & 20 & 20 & 18 \\ 9 & 8 & 8 & 7 \\ 8 & 8.5 & 7 & 9 \\ 7.5 & 8 & 8.5 & 8 \\ 8.5 & 9 & 8 & 8.5 \\ 108 & 96 & 102 & 89 \\ 82\% & 80\% & 85\% & 78\% \\ 8 & 6 & 7 & 8 \\ 8\% & 9.3\% & 10\% & 7\% \\ 96\% & 88\% & 92\% & 85\% \\ 9 & 8.5 & 9 & 8 \\ 6.9\% & 6.5\% & 7\% & 6.6\% \\ 8.5 & 8 & 8.5 & 8.5 \end{bmatrix}$$

(2)原始矩阵 A 的标准化

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0.33 & 0.33 & 1 \\ 1 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0.5 & 0.75 & 0 & 1 \\ 0 & 0.5 & 1 & 0.5 \\ 0.5 & 1 & 0 & 0.5 \\ 1 & 0.37 & 0.68 & 0 \\ 0.57 & 0.29 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0.5 & 1 \\ 0.33 & 0.67 & 1 & 0 \\ 1 & 0.27 & 0.64 & 0 \\ 1 & 0.5 & 1 & 0 \\ 0.8 & 0 & 1 & 0.2 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

(3)计算熵值

将上述标准化矩阵代入到熵值计算公式(10),  
得到各指标熵值如下表:

表 8 评价指标熵值表  
Tab. 8 Evaluation index entropy table

指标	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>
熵值	0.685	0.750	0.765	0.750	0.750	0.739	0.710
指标	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	
熵值	0.761	0.730	0.709	0.761	0.680	0.792	

(4)计算权值

根据上述权重计算公式(11)得到各指标权值如下表:



表 9 评价指标权值表  
Tab. 9 Table of weights of evaluation indicators

一级指标	二级指标	各指标熵值	各指标熵权	一级指标权重
控制管理能力	A <sub>1</sub>	0.685	0.092	0.307
	A <sub>2</sub>	0.750	0.073	
	A <sub>3</sub>	0.765	0.069	
	A <sub>4</sub>	0.750	0.073	
专业技术能力	B <sub>1</sub>	0.750	0.073	0.233
	B <sub>2</sub>	0.739	0.076	
	B <sub>3</sub>	0.710	0.084	
企业信誉及经验	C <sub>1</sub>	0.761	0.071	0.235
	C <sub>2</sub>	0.730	0.079	
	C <sub>3</sub>	0.709	0.085	
财务能力	D <sub>1</sub>	0.761	0.070	0.225
	D <sub>2</sub>	0.680	0.094	
	D <sub>3</sub>	0.792	0.061	

(5)评价选择最优对象

①将权重与目标矩阵  $R$  中相乘得到加权规范化矩阵  $V$ ;

$$V = \begin{bmatrix} 0 & 0.031 & 0.031 & 0.092 \\ 0.073 & 0.037 & 0.037 & 0 \\ 0.035 & 0.052 & 0 & 0.069 \\ 0 & 0.037 & 0.073 & 0.037 \\ 0.037 & 0.073 & 0 & 0.037 \\ 0.076 & 0.028 & 0.052 & 0 \\ 0.049 & 0.024 & 0.085 & 0 \\ 0.07 & 0 & 0.035 & 0.07 \\ 0.026 & 0.053 & 0.079 & 0 \\ 0.085 & 0.023 & 0.054 & 0 \\ 0.07 & 0.035 & 0.07 & 0 \\ 0.075 & 0 & 0.094 & 0.019 \\ 0.061 & 0 & 0.061 & 0.061 \end{bmatrix}$$

②确定正负靶心

正靶心:  $V_{\max} = [0.092, 0.073, 0.069, 0.073, 0.073, 0.076, 0.085, 0.07, 0.079, 0.085, 0.07, 0.094, 0.061]$ , 负靶心:  $V_{\min} = 0$ , 正靶心到负靶心的距离  $S_0 = 0.279$ .

③确定靶距

根据上述靶距式(15)~式(16)计算各个分包商到靶心的距离

表 10 各分包商靶距表  
Tab. 10 Subcontractors distance table

分包商	分包商 A	分包商 B	分包商 C	分包商 E
正靶距	0.144	0.189	0.134	0.212
负靶距	0.208	0.132	0.213	0.158
综合靶距	0.410	0.478	0.404	0.454

有上述各分包商的综合靶距可知, 分包商 C 的综合靶距最小,  $S^* = 0.404$ . 故选择分包商 E 中标.

通过实践, 在该分包工程施工期间, 分包商 C 的表现优秀, 无索赔情况发生, 成本、质量、工期等目标顺利实现. 而且在整个项目 M 最终决算时, 总承包商实现盈利.

3 结语

最终通过实例验证得出结论: 本文提出的分包控制价预测模型可行, 所预测出的分包控制价合理, 所建立的基于熵权灰靶法的分包商选择模型能有合理的选择优秀分包商. 并且利用 BP 神经网络以及公司以往盈利工程的承包, 分包决算价数据来预测欲招标工程的控制价, 具有较高的准确性, 预测的控制价符合该公司自身的盈利水平. 此外, 在分包工程完成之后还要及时反馈该分包工程的决算价, 以此来不断地更新修正  $K$  值, 随着新的盈利工程的不断扩充,  $K$  值的计算将会更加准确, 更具实际意义.

参考文献 References

[1] 李松, 周岚, 黄静宜. 基于 ANP 的分包商选择研究[J]. 湖北成人教育学院学报, 2013, 19(5): 49-51.  
LI Song, ZHOU Lan, HUANG Jingyi. Study on subcontractor selection based on ANP[J]. Journal of Hubei College of Adult Education, 2013, 19(5): 49-51.  
[2] 董雅文, 刘文慧. 建筑施工分包商选择模型及实证研究[J]. 建筑经济, 2012(9): 79-83.

- DONG Yawen, LIU Wenhui. Selection model and empirical study of construction subcontractors[J]. Construction Economy, 2012 (9): 79-83.
- [3] FONG P S W, CHOI S K Y. Final contractor selection using analytical hierarchy process[J]. Construction Management Economic, 2000(18): 547-557.
- [4] 邵军义, 宋岩磊, 曹雪梅, 等. 基于 TOPSIS 改进模型的工程项目承包商选择[J]. 土木工程与管理学报, 2016, 33(4): 12-17.
- SHAO Junyi, SONG Yanlei, CAO Xuemei, et al. Selection of project contractors based on TOPSIS improved model[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2016, 33 (4): 12-17.
- [5] HAMIDREZ A. A new approach for subcontractor selection in the construction industry based on portfolio theory[J]. Civil Engineering and Management, 2016, 22(3): 12-19.
- [6] 穆静静, 王哲, 曾又其. 并行工程视角下产品绿色设计评估模式构建[J]. 科技进步与对策, 2009, 26(6): 122-125.
- MU Jingjing, WANG Zhe, ZENG Youqi. Construction of green design evaluation model from the perspective of concurrent engineering[J]. Scientific and Technological Progress and Countermeasures, 2009, 26 (6): 122-125.
- [7] 卢梅, 韩小康, 孔祥坤, 等. 基于 BP 神经网络和 TOC 的工程造价预控研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2011, 43(1): 106-112.
- LU Mei, HAN Xiaokang, KONG Xiangkun, et al. Research on project cost pre-control based on BP neural network and TOC[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2011, 43 (1): 106-112.
- [8] 王吉权, 王福林, 董志贵, 等. 基于改进 BP 神经网络的电力负荷预测[J]. 数学的实践与认识, 2017, 47(9): 276-284.
- WANG Jiquan, WANG Fulin, DONG Zhigui, et al. Power load forecasting based on improved BP neural network[J]. Practice and Understanding of Mathematics, 2017, 47(9): 276-284.
- [9] 王德明, 王莉, 张广明. 基于遗传 BP 神经网络的短期风速预测模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(5): 837-841.
- WANG Deming, WANG Li, ZHANG Guangming. Short-term wind speed prediction model based on genetic BP neural network[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2012, 46 (5): 837-841.
- [10] 李帅, 魏虹, 倪细炉, 等. 基于层次分析法和熵权法的宁夏城市人居环境质量评价[J]. 应用生态学报, 2014, 25(9): 2700-2708.
- LI Shuai, WEI Hong, NI Xilu, et al. Urban human settlement environmental quality assessment in ningxia based on analytic hierarchy process and entropy weight method[J]. Journal of Applied Ecology, 2014, 25 (9): 2700-2708.
- [11] 尹鹏, 杨仁树, 丁日佳, 等. 基于熵权法的房地产项目建筑质量评价[J]. 技术经济与管理研究, 2013(3): 3-7.
- YIN Peng, YANG Renshu, DING Rijia, et al. Evaluation of building quality of real estate project based on entropy weight method[J]. Research on Technology, Economy and Management, 2013 (3): 3-7.
- [12] 薄煜. 基于建筑供应链的工程建设分包商选择评价研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- BO Yu. Research on selection and evaluation of construction subcontractors based on construction supply chain[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [13] 江新, 朱沛文, 杨铁雯, 等. 设计院总承包模式下施工分包商选择研究[J]. 工程管理学报, 2014, 28(5): 37-41.
- JIANG Xin, ZHU Peiwen, YANG Yiwen, et al. Study on the selection of construction subcontractors under the general contracting mode of design institute [J]. Journal of Engineering Management, 2014, 28 (5): 37-41.
- [14] CAO Wang. Contractor-subcontractor relationships with the implementation of emerging interorganizational technologies: roles of cross-project learning and pre-contractual opportunism[J]. International Journal of Construction Education and Research, 2014, 10 (4): 28-35.
- [15] MICHAELA Schaffhauser-Linzatti. Construction management: subcontractor scopes of work[J]. Construction Management and Economics, 2012, 30(9): 46-55.
- [16] SERDAR Ulubeyli, Aynur Kazaz. Fuzzy multi-criteria decision making model for subcontractor selection in international construction projects[J]. Technological and Economic Development of Economy, 2016, 22 (2): 37-42.
- [17] YU Feng. Study on the selection of subcontractors based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Advanced Materials Research, 2012, 2091 (594): 32-38.
- [18] HAMIDREZ A Abbasianjahromi, HOSSEIN Rajaie. A new decision making model for subcontractor selection and its order allocation[J]. Project Management Journal, 2014, 45(1): 21-26.
- [19] 张浩. EPC 合同模式下分包商的选择及评估“过程”管理[J]. 北京石油管理干部学院学报, 2015, 22(4): 26-31.
- ZHANG Hao. Selection and evaluation of subcontractors under EPC contract model[J]. Journal of Beijing Petroleum Management Cadre College, 2015, 22(4): 26-31.
- [20] 罗党. 基于正负靶心的多目标灰靶决策模型[J]. 控制与决策, 2013, 28(2): 241-246.
- LUO Dang. Multi-objective grey target decision-making model based on positive and negative target centers [J]. Control and decision-making, 2013, 28 (2): 241-246.