

模糊多属性决策法在海底电缆路由方案比选中的应用

徐国强¹, 徐翠玲², 张志卫¹, 闫文文¹

(1. 国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061; 2. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所 青岛 266071)

摘要:海底电缆预选路由方案的比选需要参考多种指标,这些指标包含定量和定性两种,但各指标间的不可公度性,给路由方案的选择提出挑战。文章提出了一种基于离差思想和模糊向量投影的多属性决策法。首先引入三角模糊数,将定性指标合理量化,构建决策矩阵,规范化后运用离差思想求解各指标权重,然后计算各方案在正理想方案和负理想方案上的投影,最后求出相对贴近度,依据其大小比选出最佳方案。

关键词:路由比选;离差投影;三角模糊数;指标权重;混合型多属性决策

中图分类号:P753

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2017)11-0037-05

The Application of Fuzzy Multi-attribute Decision Making Method for Routing Scheme Comparison of Submarine Cables

XU Guoqiang¹, XU Cuiling², ZHANG Zhiwei¹, YAN Wenwen¹

(1. The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;

2. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China)

Abstract: Multi indexes, which include both quantitative indexes and qualitative indexes, should be considered in the selection of routing scheme of submarine cable, however, the incommensurability of these indexes gives a challenge in the scheme selection. In this paper, a hybrid multiple attribute decision making method based on deviation projection was introduced to choose the routing scheme of submarine. Firstly, the qualitative indexes were converted into triangular fuzzy number, reasonably quantifying the qualitative index, and a decision matrix was constructed. Then the weights of each index were calculated by the deviation maximization method, and the projection of each scheme on the positive ideal scheme and the negative ideal scheme was calculated. Finally, the degrees of relative closeness were calculated, and then the closeness degrees were used to compare the routing scheme. Take one offshore wind farm construction project as an example, three routing schemes of submarine cables were compared by this method. It was found that the first scheme had obvious advantages in the cable length, investment, installation costs and the utilization of maritime space,

收稿日期:2017-09-10;修订日期:2017-10-09

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2015G14);海岛旅游海滩管理技术研究与应用(201405037);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2014G16)。

作者简介:徐国强, 助工, 硕士, 研究方向为海洋工程地质与勘查技术

etc.The conclusions were consistent with both the qualitative indicators and quantitative analysis, revealing that the method was feasibility and reliability in the selected of submarine cable routing scheme.

Key words: Submarine routing comparison, Deviation projection, Triangular fuzzy number, Indexes weight, Mixed type multiple attribute decision making

1 前言

自工业革命以来,世界能源消费剧增,尤其是一次性能源的消耗会产生大量的环境、经济和社会问题。我国已经制定了可持续发展的战略,不再盲目地追求短期经济利益,而是要保证经济、环境和人文的可持续发展。目前,风力、太阳能和潮汐能等是发展较快的新能源,其中风力发电是其中发展最快,布局最广的。我国海域广、岸线长,风能理论蕴藏量大,开发海上风电建设具有很好的自然条件支持。

随着目前海上风电开发的不断发展,海上风电场至陆地间的海底电缆建设日益增多。风电场位置确定以后,海底电缆建设前,工程建设的首要任务是开展从海上风电场至陆上升压站的海底电缆路由的桌面研究工作。主要是对相关的海洋地质环境条件、海洋动力环境和海洋开发活动等方面的资料进行广泛的收集与分析整理,同时依据国家颁发的相关法律法规和要求对预选路由进行综合分析及比较,选出最佳路由,并上报主管部门,为后期的路由勘察提供指导和重要依据。

海底电缆预选路由的比选需要考虑非常多的制约因素,既有线路长度、工程建设投资、用海面积等定量指标,同时又存在地质构造评价、水文气象环境因素评价、海洋开发利用活动评价等定性指标,属于多属性决策问题。现阶段海底电缆路由方案的比选,主要是从登陆段条件、工程地质条件、气象及海洋水文环境条件和海洋开发活动等方面进行综合评价,这些评价条件中既存在定量指标也存在定性指标^[1],定量指标的优选相对容易,主要遵循损耗小收益大的原则,定性指标的比选相对复杂,要根据具体项目、具体区位的具体情况进行分析,推荐出最佳的方案。如果比选过程中出现了各方案的定性指标互有优

劣,定量指标又相差不大的情况,则缺少对应的评价比选方法。目前效用理论法、物元分析、灰色关联度以及模糊综合评判法在铁路选线的方案比选中进行了应用^[2-4],但是往往计算过程和评价模型比较复杂,而且不能综合比选定量指标和定性指标。

为解决同时评价定量指标和定性指标的问题,本文引入三角模糊数来替代定性指标,同时基于离差思想,采用多属性决策法共同评价定性和定量的各项指标,建立了海底电缆路由比选的模式,提供了另一种优选海底电缆路由的方法,使其更加科学化^[5-7]。

2 路由比选的评价指标

海底电缆预选路由的评价指标很多,本研究主要分为基础条件评价、功能区划符合性、经济合理性、环境影响评价和周边带动效应 5 个一级指标,各一级指标进一步细分为 29 个二级指标,如表 1 所示,同时包含定量与定性指标。这些指标的选取并不是一成不变的,可以根据具体项目的需求做不同程度的取舍。

表 1 海底电缆路由比选的指标体系

一级指标	二级指标
基础条件评价	能源利用率
	用海面积
	征用养殖区数量
	水文气象条件
	自然灾害
	区域构造条件
	工程地质条件
	海底地形地貌
功能区划符合性	功能区划符合性
	地方规划符合性
	集约用海分析

续表	
一级指标	二级指标
经济合理性	海域使用面积
	电缆长度
	设备投资
	安装费用
	征海补偿
环境影响评价	对港口码头影响
	对锚地影响
	对周边管缆影响
	对水质影响
	对渔业养殖影响
	对周边海岛影响
	对鸟类资源影响
	对海区冲淤影响
	对旅游资源影响
周边带动效应	满足地方需求能力
	改善电网布局的意义
	促进周边经济发展
	对地方规划的影响

3 模糊多属性决策法在路由比选应用中的原理和思路

定义 1:记 $a=(a^l,a^m,a^u)$,其中 $0< a^l \leqslant a^m \leqslant a^u$,则称 a 为一个三角模糊数^[8]。

设要对海底电缆路由进行比选的方案为 $X=(X_1,X_2,\cdots,X_m)$,方案的指标集表示为 $C=\{C_1,C_2,\cdots,C_n\}$,其中决策指标 $C_j\{j\in N_1=(1,2,\cdots,k_1)\}$ 的取值为精确数, $C_j\{j\in N_2=(k_1+1,k_2+2,\cdots,n)\}$ 的取值为定性指标转换的模糊数;设定指标的权重集为 $W=(W_1,W_2,\cdots,W_n)(0<W_i<1,\sum_{i=1}^nW_i=1)$ 是未知的;路由决策方案的决策矩阵记为 $A=(a_{ij})_{m\times n}$ 。指标的类型一般可分为取值越大越好的效益型指标和取值越小越好的成本型指标,设 I_1 表示效益型, I_2 表示成本型。

定义 2:设 $\alpha=(\alpha_1,\alpha_2\cdots,\alpha_n)$ 和 $\beta=(\beta_1,\beta_2\cdots,\beta_n)$ 为两个向量,称

$$Prj_{\beta}(\alpha)=\frac{\sum_{j=1}^n\alpha_j\beta_j}{\sqrt{\sum_{j=1}^n\alpha_j^2}\sqrt{\sum_{j=1}^n\beta_j^2}}\cdot\sqrt{\sum_{j=1}^n\alpha_j^2}=\frac{\sum_{j=1}^n\alpha_j\beta_j}{\sqrt{\sum_{j=1}^n\beta_j^2}}$$

$Prj_{\beta}(\alpha)$ 为 α 在 β 上的投影^[9]。一般 $Prj_{\beta}(\alpha)$ 越大表明 α 与 β 越接近。

根据定义 2,可以定义指标值精确数的投影算子为:

当指标值为精确数时,向量 $\alpha=(\alpha_1,\alpha_2\cdots,\alpha_n)$ 在 $\beta=(\beta_1,\beta_2\cdots,\beta_n)$ 上的投影如定义 2 所示。

同理可以推导出,当指标值为三角模糊数时,则三角模糊向量 $\alpha=((\alpha_1^l,\alpha_1^m,\alpha_1^u),(\alpha_2^l,\alpha_2^m,\alpha_2^u),\cdots,(\alpha_n^l,\alpha_n^m,\alpha_n^u))$ 在向量 $\beta=((\beta_1^l,\beta_1^m,\beta_1^u),(\beta_2^l,\beta_2^m,\beta_2^u),\cdots,(\beta_n^l,\beta_n^m,\beta_n^u))$ 上的投影为

$$Prj_{\beta}(\alpha)=\frac{\sum_{j=1}^n(\alpha_j^l\beta_j^l+\alpha_j^m\beta_j^m+\alpha_j^u\beta_j^u)}{\sqrt{[\sum_{j=1}^n[(\beta_j^l)^2+(\beta_j^m)^2+(\beta_j^u)^2]}}}$$

下面构造同时含有精确数和三角模糊数的混合型指标向量 $\alpha=(\alpha_1,\cdots,\alpha_{k_1},\alpha_{k_1+1},\cdots,\alpha_n)$ 在 $\beta=(\beta_1,\cdots,\beta_{k_1},\beta_{k_1+1},\cdots,\beta_n)$ 上的投影为

$$Prj_{y+}()=\frac{\sum_{j=1}^{k_1}\alpha_j\beta_j+\sum_{j=k_1+1}^n(\alpha_j^l\beta_j^l+\alpha_j^m\beta_j^m+\alpha_j^u\beta_j^u)}{\sqrt{\sum_{j=1}^{k_1}\beta_j^2+\sum_{j=k_1+1}^n[(\beta_j^l)^2+(\beta_j^m)^2+(\beta_j^u)^2]}}$$

(1)

其中 $\alpha_j=(\alpha_j^l,\alpha_j^m,\alpha_j^u),\beta_j=(\beta_j^l,\beta_j^m,\beta_j^u),j=k_1+1,\cdots,n$ 为三角模糊数。

定义 3:设 $\tilde{a}=[a^l,a^m,a^u],\tilde{b}=[b^l,b^m,b^u]$ 都是三角模糊数,那么两者之间的距离 $D_H(\tilde{a},\tilde{b})$ 用式(2)进行表示

$$D_H(\tilde{a},\tilde{b})=\sqrt{\frac{1}{3}[(a^l-b^l)^2+(a^m-b^m)^2+(a^u-b^u)^2]}$$

(2)

定义 4:称 $S=\{\text{最好,很好,好,较好,一般,较差,差,很差,最差}\}$ 为语言类模糊数集,分别将其转换为三角模糊数,两者间相互关系如表 2 所示。

表 2 语言类模糊数与三角模糊数的关系	
语言类模糊数集	三角模糊数
最差	(0,0.1,0.2)
很差	(0.1,0.2,0.3)
差	(0.2,0.3,0.4)

续表

语言类模糊数集	三角模糊数
较差	(0.3,0.4,0.5)
一般	(0.4,0.5,0.6)
较好	(0.5,0.6,0.7)
好	(0.6,0.7,0.8)
很好	(0.7,0.8,0.9)
最好	(0.8,0.9,1.0)

由于不同指标之间的取值单位、量纲和数量级是不统一的,导致不同指标无法放在同一尺度下进行比较,因此对决策矩阵进行无量纲和规范化处理是解决多属性决策问题的首要步骤。规范化处理依据指标类型可分为效益型和成本型,同时其取值类型可分为精确数和三角模糊数两类,式(3)和式(4)分别表示了当指标取值为精确数时的规范化方法和当指标取值为三角模糊数时的规范化方法。设矩阵 $S=(s_{ij})_{m \times n}$ 为决策矩阵 A 规范化后得到的矩阵。

(1)当指标取值为精确数时的规范化方法

$$s_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_{ij})^2}}, j \in I_1,$$
$$s_{ij} = \frac{1/a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (1/a_{ij})^2}}, j \in I_2 \tag{3}$$

(2)当指标取值为三角模糊数时的规范化方法

$$s_{ij} = \left(\frac{a_{ij}^l}{a_i^{u+}}, \frac{a_{ij}^m}{a_i^{u+}}, \frac{a_{ij}^u}{a_i^{u+}} \right), a_i^{u+} = \max_j \{a_{ij}^u\}, j \in I_1$$
$$s_{ij} = \left(\frac{a_i^{l-}}{a_{ij}^u}, \frac{a_i^{l-}}{a_{ij}^m}, \frac{a_i^{l-}}{a_{ij}^l} \right), a_i^{l-} = \max_j \{a_{ij}^l\}, j \in I_2 \tag{4}$$

通常,如果所有预选方案关于第 j 个指标 C_j 的取值 $a_{ij}(i \in m)$ 之间的差异越大,则说明该指标在方案比选中所占比重越大;差异越小则说明该指标在方案比选中所占比重越小^[10]。所以,各指标的权重无须考虑指标本身的重要程度,只需要关注各备选方案之间指标的取值离差,该值越大说明所占权重越大;反之,离差越小所占权重就越小。

根据文献[5]和文献[10],基于离差投影方法,各指标权重的求解公式为

$$W_j = \frac{\sum_{i=1k=1}^m \sum_{j=1k=1}^m d(s_{ij}, s_{kj})}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m d(s_{ij}, s_{kj})}, j = 1, \cdots, n \tag{5}$$

定义 5 $Y=(y_{ij})_{m \times n}=(W_j s_{ij})_{m \times n}$,称 $Y=(y_{ij})_{m \times n}$ 为规范化矩阵 $S=(s_{ij})_{m \times n}$ 进行加权处理得到的加权规范化矩阵。

定义 6 $Y^+=(y_1^+, y_2^+, \cdots, y_n^+)$ 为矩阵 $Y=(y_{ij})_{m \times n}$ 的正理想方案, $Y^-= (y_1^-, y_2^-, \cdots, y_n^-)$ 为矩阵 $Y=(y_{ij})_{m \times n}$ 的负理想方案,方法如下

(1)对于精确实数型指标

$$y_j^+ = \max_{1 \leq i \leq m} s_{ij}, j \in I_1, y_j^- = \min_{1 \leq i \leq m} s_{ij}, j \in I_2$$

(2)对于三角模糊型指标

$$y_j^+ = (y_j^{+l}, y_j^{+m}, y_j^{+u}) = (\max_{1 \leq i \leq m} s_{ij}^l, \max_{1 \leq i \leq m} s_{ij}^m, \max_{1 \leq i \leq m} s_{ij}^u), j \in I_1$$
$$y_j^\pm = (y_j^{-l}, y_j^{-m}, y_j^{-u}) = (\min_{1 \leq i \leq m} s_{ij}^l, \min_{1 \leq i \leq m} s_{ij}^m, \min_{1 \leq i \leq m} s_{ij}^u), j \in I_2$$

根据定义 2 和式(1)可以求出每个方案在正理想方案上的投影 $\text{Pr } j_{y+}(X_j)$,以及每个方案在负理想方案上的投影 $\text{Pr } j_{y-}(X_j)$ 。下一步可以计算各方案的综合相对贴近期

$$P_j = \frac{\text{Pr } j_{y+}(X_j)}{\text{Pr } j_{y+}(X_j) + \text{Pr } j_{y-}(X_j)} \tag{6}$$

P_j 值越大,说明方案与理想方案越接近,按照 P_j 值大小可以排出各方案的优劣, P_j 值最大的方案说明是最佳方案。

4 实例分析

结合福建某海上风电项目海底电缆路由比选实例分析。设计院共提供 3 个方案进行比选,命名为 X_1, X_2, X_3 。对各方案对应指标进行筛选(如果决策方案在某指标下的指标取值无差异,说明在比选中不占权重),本研究选取海底电缆路由的电缆长度、安装费用、周边管缆条件等定量和定性相结合的 8 个指标(表 3),分别用 $C_1, C_2, \cdots, C_8$ 表示(其中 $C_1, C_2, \cdots, C_5$ 为成本型指标, C_6, C_7, C_8 为效益型指标),每个方案的指标取值见表 3。

(1)计算权重:将定性指标 C_6, C_7, C_8 转换为三角模糊数表示,构造只包含数字的决策矩阵,然后用式(3)、式(4)对决策矩阵进行规范化处理,再利用式(5)计算每个指标的在评价体系中所占的权重

表 3 路由由各方案对应指标的取值

指标	方案 X_1	方案 X_2	方案 X_3
电缆长度/km(C_1)	48.8	51.2	50.6
设备投资/千万元(C_2)	4 740	4 919	5 173
安装费用/千万元(C_3)	3 446	3 612	3 916
海域使用面积/hm ² (C_4)	63.3	65.8	68.1
征海面积/hm ² (C_5)	10.2	12.6	9.6
集约用海分析(C_6)	较好	一般	好
海底地形地貌条件(C_7)	好	较好	一般
周边管缆条件(C_8)	较差	一般	差

$$W=(\begin{matrix} 0.032\ 2 & 0.058\ 3 & 0.084\ 8 & 0.048\ 9 \\ 0.175\ 6 & 0.218\ 9 & 0.230\ 5 & 0.150\ 8 \end{matrix})$$

可以看出,指标 C_7 海底地形地貌条件比选中,3 个方案间相对差异最大,指标 C_1 电缆长度条件比选中,3 个方案相对差异较小。

(2)求算投影:首先加权处理,然后根据定义 6 确定正理想方案和 3 个方案在正理想方案上的投影,以及确定负理想方案和 3 个方案在负理想方案上的投影,即

$$\begin{aligned} \Pr j_{y+}(X_1) &= 0.399\ 6, \Pr j_{y+}(X_2) = 0.335\ 9, \\ \Pr j_{y+}(X_3) &= 0.370\ 0 \\ \Pr j_{y-}(X_1) &= 0.398\ 2, \Pr j_{y-}(X_2) = 0.337\ 8, \\ \Pr j_{y-}(X_3) &= 0.369\ 5 \end{aligned}$$

(3)求解相对贴近度:根据式(6)分别求解每个方案的相对贴近度 P_j :

$$P_1=0.500\ 9, P_2=0.498\ 5, P_3=0.500\ 3.$$

可以看出相对贴近度 $P_1>P_3>P_2$ 。因此路由方案 X_1 为最佳方案。

根据表 3 可知,方案 X_1 在电缆长度、投资、安装费用和海域使用面积等方面优势明显。在该项目桌面路由报告评审中,评审专家也倾向于推荐方案 X_1 为最佳方案,与本研究模型的计算分析结果一致。

5 结语

根据海底电缆路由比选评价指标中同时存在

定量指标和定性指标的特点,首先引入三角模糊数,将定性指标合理量化,构建决策矩阵,规范化后运用离差思想求解各指标权重,然后计算各方案在正理想方案和负理想方案上的投影,最后求出相对贴近度,比选出最佳方案。模糊多属性决策法在海底电缆路由方案比选中的应用,避免了各方案的定性指标互有优劣,定量指标又近似的难以比选的情况。最后通过实例分析,说明模糊多属性决策法在海底电缆路由方案比选中的应用具有可行性。桌面研究阶段提出的推荐方案并不是一成不变的,在路由外业勘察完成后,可以根据勘察结果进行微调,主要是避让不良地质体、人工障碍物等影响海缆敷设的因素。

参考文献

[1] 朱茵,孟志勇,阚叔愚.铁路建设优选方法的研究[J].北方交通大学学报,2000,23(2):127—130.

[2] 吴小萍,詹振炎.基于灰色和模糊集理论的铁路方案多目标综合评价方法及模型研究[J].铁道学报,2001,23(5):107—113.

[3] 李远富,薛波,邓域才.铁路选线设计方案多目标决策模糊优选模型及其应用研究[J].西南交通大学学报,2000,35(5):465—470.

[4] 陈俊,邵海鹏.铁路选线设计方案物元优选模型[J].铁道标准设计,2011(3):5—8.

[5] 杨静,邱苑华.基于离差的模糊多属性决策法及其应用[J].系统工程,2008,26(6):107—110.

[6] 闫书丽,赵丽英,王传丽.基于投影的不确定多属性决策方法[J].河南科技大学学报,2006,30(1):85—87.

[7] 周宏安,刘三阳.基于离差最大化模型的模糊多属性决策投影法[J].系统工程与电子技术,2007,29(5):741—744.

[8] 徐泽水.不确定多属性决策方法及应用[M].北京:清华大学出版社,2004.

[9] 王应明.多指标决策与评价的新方法:投影法[J].系统工程与电子技术,1999,21(3):1—4.

[10] 罗圆,姚令侃,朱颖.基于离差投影的山区铁路选线方案比选模型[J].铁道标准设计,2013(10):1—6.